

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Kvalita řezných ploch vybraných technických materiálů
po aplikaci vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku**

Quality of Cut Surface of Selected Technical Materials
after Application of High-Speed Abrasive Water Jet

Student:	Bc. Ladislav Chrobák
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Libor Sitek, Ph.D.
Konzultant bakalářské práce:	doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ladislav Chrobák**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: Kvalita řezných ploch vybraných technických materiálů po aplikaci
vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku
Quality of Cut Surfaces of Selected Technical Materials after
Application of High-Speed Abrasive Water Jet

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Základy technologie vysokorychlostního vodního paprsku.
3. Metody hodnocení topografie povrchů.
4. Experimentální ověření vlivu řezných parametrů na topografii povrchu technických materiálů.
5. Analýza a interpretace naměřených dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. London : E & FN Spon, Chapman & Hall, London, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [3] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis, 1995. ISBN 1-880342-01-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Sitek, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 1. května 2016

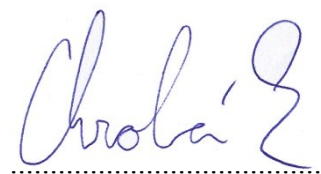


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla, školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomové práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 1. května 2016



Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Ladislav Chrobák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Karolíny Světlé č. p. 1358/26

Havířov – Podlesí, okr. Karviná

736 01

Poděkování:

Děkuji Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při zpracování mé diplomové práce. Dále chci poděkovat zaměstnancům Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i. za pomoc při experimentech a poskytnutí literárních podkladů. Poděkování patří také doc. Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za poskytnutí rad důležitých pro zpracování práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CHROBÁK, Ladislav. *Kvalita řezných ploch vybraných technických materiálů po aplikaci vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Libor Sitek.

Diplomová práce se zabývá hodnocením kvality řezných ploch pro vybrané technické materiály po řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. Práce je rozdělena na dvě hlavní části. V první - teoretické části práce jsou popsány některé nekonvenční metody obrábění a pak vzájemně porovnány podle vybraných parametrů při řezání materiálu. Druhá část práce je zaměřena na experiment, který porovnává kvalitu řezných ploch po řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem při různě nastavených parametrech. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky experimentu (vzhled, drsnost a kvalita řezného povrchu) v souvislosti s parametry paprsku a druhem technických materiálů. Detailní údaje o experimentu a dosažené výsledky včetně bližší specifikace použitých zařízení jsou uvedeny v příloze.

ANNOTATION OF DISSERTATION

CHROBÁK, Ladislav. The quality of the cutting surfaces of selected technical materials after application of high-speed abrasive water jet. Ostrava, 2016. Master's thesis. VSB - Technical University of Ostrava. Supervisor Libor Sitek.

The master's thesis deals with the evaluation of the quality of cutting surfaces of selected technical materials after cutting using a high-speed abrasive water jet. The work is divided into two main parts. The first theoretical part describes some unconventional methods of machining which are compared with each other according to selected parameters used during the material cutting. The second part focuses on an experiment which compares the quality of cutting surfaces after cutting by the high-speed abrasive water jet at different preset parameters. Finally, results of the experiment (i.e. appearance, roughness and quality of the cutting surface) are evaluated in connection with the jet parameters and the type of technical materials. Detailed experimental data and obtained results, including specification of the devices used, are listed in the Annex.

1 Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	10
ÚVOD.....	11
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	12
ROZDĚLENÍ NMO PODLE VYUŽÍVANÉHO FYZIKÁLNÍHO PRINCIPU	12
1.1 ELEKTROEROZÍVNÍ OBRÁBĚNÍ (ELECTRO-DISCHARGE MACHINING, EDM).....	13
1.2 ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ (ELECTRO-CHEMICAL MACHINING, ECM)	15
1.3 CHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ (CHEMICAL MACHINING, CM)	16
1.4 OBRÁBĚNÍ LASEREM (LASER BEAM MACHINING, LBM)	18
1.5 OBRÁBĚNÍ PLAZMOU (PLASMA BEAM MACHINING, PBM)	19
1.6 OBRÁBĚNÍ ELEKTRONOVÝM PAPRSKEM (ELECTRON BEAM MACHINING, EBM).....	21
1.7 OBRÁBĚNÍ IONTOVÝM PAPRSKEM (ION BEAM MACHINING, IBM)	23
1.8 OBRÁBĚNÍ ULTRAZVUKEM (ULTRASONIC MACHINING, USM)	24
1.9 OBRÁBĚNÍ PROUDEM VZDUCHU S ABRAZIVEM (ABRASIVE JET MACHINING, AJM)	25
1.10 STEREOLITOGRAFIE	27
2 OBRÁBĚNÍ VODNÍM (WATER JET MACHINING, WJM) A ABRAZIVNÍM VODNÍM PAPRSKEM (ABRASIVE WATER JET MACHINING, AWJM)	28
2.1 VZNIK ÚKOSU:	30
2.2 APLIKACE WJM A AWJM	32
2.3 POPIS ZAŘÍZENÍ NA ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM	33
3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH NEKONVENČNÍCH METOD [1,4,14,15] .	35
4 HODNOCENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU	36
4.1 HODNOCENÍ KVALITY ŘEZNÉ PLOCHY PRO AWJM:	37
4.2 MĚŘICÍ TECHNIKA	40
4.2.1. <i>Mechanické metody</i>	41
4.2.2 <i>Optické metody</i>	41
4.2.3 <i>Jiné metody</i>	42
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
5.1 ZKUŠEBNÍ MATERIÁLY:	43
5.1.1 <i>Nerezová ocel 1.4462</i>	43

5.1.2	Ocel 1.1191.....	44
5.1.3	Hliníková slitina AlMgSi	45
5.1.4	Mosaz CuZn37.....	45
5.2	MĚŘENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU	46
5.3	EXPERIMENTÁLNÍ POSTUP	47
6	VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	48
6.1	NEREZOVÁ OCEL 1.4462	49
	Zkušební vzorek č. 1	49
	Zkušební vzorek č. 2	50
	Zkušební vzorek č. 3	51
	Zkušební vzorek č. 4	52
	Zkušební vzorek č. 5	53
	Zkušební vzorek č. 6	54
6.2	MOSAZ CUZn37.....	55
	Zkušební vzorek č. 1	55
	Zkušební vzorek č. 2	56
	Zkušební vzorek č. 3	57
	Zkušební vzorek č. 4	58
	Zkušební vzorek č. 5	59
	Zkušební vzorek č. 6	60
6.3	OCEL 1.1191.....	61
	Zkušební vzorek č. 1	61
	Zkušební vzorek č. 2	62
	Zkušební vzorek č. 3	63
	Zkušební vzorek č. 4	64
	Zkušební vzorek č. 5	65
	Zkušební vzorek č. 6	66
6.4	HLINÍKOVÁ SLITINA ALMgSi	67
	Zkušební vzorek č. 1	67
	Zkušební vzorek č. 2	68
	Zkušební vzorek č. 3	69
	Zkušební vzorek č. 4	70
	Zkušební vzorek č. 5	71

<i>Zkušební vzorek č. 6</i>	72
6.5 POROVNÁNÍ VZORKŮ	73
6 DISKUSE VÝSLEDKŮ	75
7 ZÁVĚR	77
8 POUŽITÁ LITERATURA	78

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<i>AFM</i>	Obrábění proudem vzduchu
<i>AJM</i>	Obrábění proudem vzduchu a abraziva
<i>ASJ</i>	Suspenzní vodní paprsek
<i>AWJ</i>	Abrazivní vodní paprsek
<i>AWJM</i>	Obrábění abrazivním vodním paprskem
<i>CAD</i>	Počítačem podporované projektování
<i>CM</i>	Chemické obrábění
<i>CNC</i>	Počítačově číslicové řízení
<i>ČSN</i>	Česká státní norma
<i>EBM</i>	Obrábění elektronovým paprskem
<i>ECM</i>	Elektrochemické obrábění
<i>EDM</i>	Elektroerozivní obrábění
<i>IBM</i>	Obrábění iontovým paprskem
<i>IJM</i>	Obrábění ledovým paprskem
<i>LBM</i>	Obrábění laserem
<i>MESH</i>	Zrnitost
<i>NMO</i>	Nekonvenční metody obrábění
<i>PAM</i>	Obrábění obloukem plazmy
<i>PBM</i>	Obrábění paprskem plazmy
<i>RTG</i>	Rentgen
<i>RUM</i>	Rotační ultrazvukové obrábění
<i>SK</i>	Slinutý karbid
<i>USM</i>	Obrábění ultrazvukem
<i>WJ</i>	Vodní paprsek
<i>WJM</i>	Obrábění vodním paprskem

Úvod

Mezi průmyslovými odvětvími v České republice má zásadní význam strojírenství, protože zajišťuje pro ostatní hospodářství výrobní techniku (stroje). V současné době se v různých odvětvích průmyslu zvyšuje poptávka po moderních a kvalitních materiálech. Zároveň je kladen velký důraz na zkrácení obráběcích a manipulačních časů, kvalitu výroby a snížení nákladů spojených s výrobou. Spoustu nových materiálů lze jen těžko, nebo nelze vůbec obrobit klasickým způsoby. Je však možno využít tzv. nekonvenční metody obrábění (NMO), které využívají zpravidla jiné fyzikální principy, než klasické třískové obrábění. [1,4,8]

Poměrně velmi rozšířenou metodou nekonvenčního obrábění je technologie vodního paprsku (WJM) a abrazivního vodního paprsku (AWJM). Jedním z prvních, kdo prokazatelně a úspěšně využil vysokého tlaku vody k řezání, byl Dr. Norman Franz. Jeho první experiment byl zaznamenán již v padesátých letech minulého století. Dr. Franz při něm experimentoval s řezáním dřeva pomocí vysokorychlostního vodního paprsku. Dokázal, že velmi úzký paprsek vody, dosahující obrovské rychlosti při výtoku z trysky, má dostatečný řezný výkon, který by mohl být využit i při řezání dalších materiálů. Dr. Franz je tak právem považován za „otce vodního paprsku“. [29]

Koncem sedmdesátých let minulého století se možnostmi, jak u vysokorychlostního vodního paprsku zvýšit řezný výkon tak, aby byl schopen řezat kovy a jiné tvrdé materiály, zabýval Dr. Mohamed Hashish. Došel k závěru, že přítomností abrazivních materiálů ve vodním paprsku se výrazně zvyšuje jeho účinnost. V roce 1979 na základě svých poznatků vytvořil tzv. abrazivní vodní paprsek. Na rozdíl od Dr. Franze je Dr. Hashish považován za „otce abrazivního vodního paprsku“. Technologie abrazivního vodního paprsku byla v pozdější době použita na řezání oceli, skla i betonu a od roku 1983 se začala komerčně využívat. [29]

Má diplomová práce je zaměřena na hodnocení kvality řezných ploch na zkušebních vzorcích několika kovových materiálů, které byly vyřezány abrazivním vodním paprskem při různém nastavení parametrů paprsku. Kvalita se hodnotila na základě zjištěných drsností povrchu v horní a spodní části řezné plochy.

1 Nekonvenční metody obrábění

Technologie abrazivního vodního paprsku se řadí mezi nekonvenční metody obrábění (NMO). Lze je charakterizovat tím, že jsou založeny na jiném způsobu úběru materiálu než klasické třískové obrábění. Pro obrábění materiálů se nejčastěji využívá chemických, tepelných a případně mechanických principů nebo jejich vzájemné kombinace. Charakteristickou vlastností mnohých NMO je bezsilové působení na materiál. Při NMO také nedochází k vytvoření klasické třísky, která vzniká u klasického konvenčního způsobu obrábění. [1,6,9]

Na rozšíření oblasti působnosti aplikací nekonvenčních metod obrábění se podílí vývoj obráběcích strojů, využití CNC řídicích systémů a umělé inteligence u obráběcích strojů. CNC řídicí systémy dovolují přesný a snadný pohyb obrobku anebo nástroje obvykle ve třech sobě kolmých osách. Tyto systémy umožňují také nezávislé řízení v šesti osách. [1,10]

Rozdělení NMO podle využívaného fyzikálního principu

Elektro-tepelné principy		
	Elektroerozivní obrábění	EDM - Electro Discharge Machining
	Obrábění paprsky koncentrované energie	
	Fotonů (laser)	LBM - Laser Beam Machining
	Elektronů	EBM - Electron Beam Machining
	Plazmy	PBM - Plasma Beam Machining
	Iontů	IBM - Ion Beam Machining
Elektro-chemický princip		
	Elektro-chemické obrábění	ECM - Electro - Chemical Machining
Chemický princip		
	Chemické obrábění	CHM - Chemical Machining
Mechanické principy		
	Abrazivní obrábění	
	Ultrazvuk	USM - Ultra Sonic Machining
	Proud brusiva	AJM - Abrasive Jet Machining
	Vodní paprsek	WJM - Water Jet Machining

Obr. 1.1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění [6]

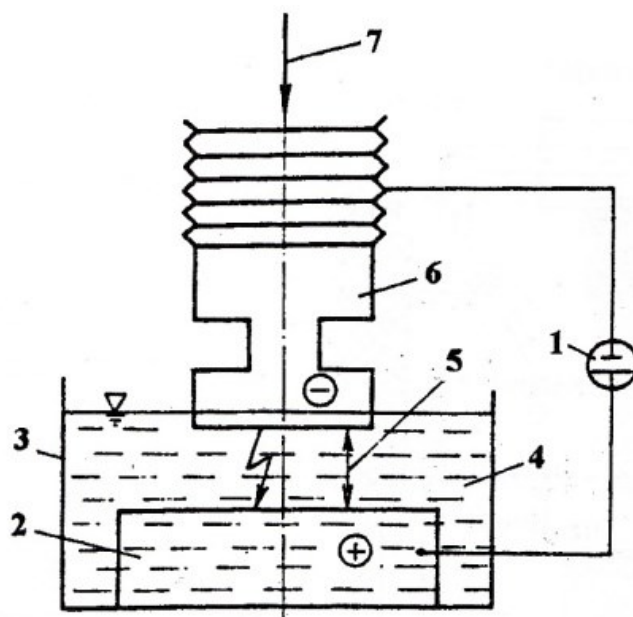
Podle způsobu úběru materiálu se NMO dělí na:

- *Chemické obrábění* – elektrochemické a chemické obrábění,
- *obrábění elektrickým výbojem* – elektroerozivní obrábění elektrickou jiskrou a elektrickým obloukem,
- *obrábění mechanickými procesy* – obrábění ultrazvukem, kapalinovým paprskem a proudem abraziva,
- *obrábění paprskem koncentrované energie* – laser, elektronový paprsek, iontový paprsek a plazma. [1,9]

V další části diplomové práce stručně popíšu principy některých v současnosti používaných a rozšířených nekonvenčních metod obrábění včetně výhod a nevýhod při jejich používání.

1.1 Elektroerozivní obrábění (Electro-Discharge Machining, EDM)

Podstatou elektroerozivní technologie obrábění (EDM) je přeměna elektrického výboje na tepelnou energii (obr. 1.1.1). Toto obrábění musí po celou dobu probíhat v dielektriku (kapalina s vysokým elektrickým potenciálem). Jako dielektrikum může být použit petrolej, destilovaná voda, roztok soli, speciální dielektrika atd. Při procesu dochází k výboji mezi nástrojem (katoda) a obrobkem (anoda), jehož důsledkem je odtavení materiálu v místě obrábění. Na základě výboje (jiskry nebo oblouku) můžeme EDM rozdělit na tyto základní druhy – elektroimpulsní, elektrojiskrový, anodomechanický a elektrokontaktní. Hlavním požadavkem procesu je dosáhnout co nejmenšího úběru hmoty na nástroji a zároveň největšího úběru na obrobku. Touto metodou lze obrábět i velmi tvrdé materiály - např. karbidy a jiné. Podstatná je však elektrická vodivost obráběného materiálu. [1,5,6]



1 – generátor; 2 – obrobek; 3 – pracovní vana;
4 – pracovní kapalina; 5 – pracovní mezera;
6 – nástrojová elektroda; 7 – posuv nástrojové
elektrody

Obr. 1.1.1 Princip elektroerozivního obrábění

Výhody:

- Možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti,
- snadná automatizace procesu,
- velký rozsah pracovních parametrů,
- velmi přesná metoda,
- výroba tvarových součástí, snižuje se pracnost při jejich výrobě. [1,4]

Nevýhody:

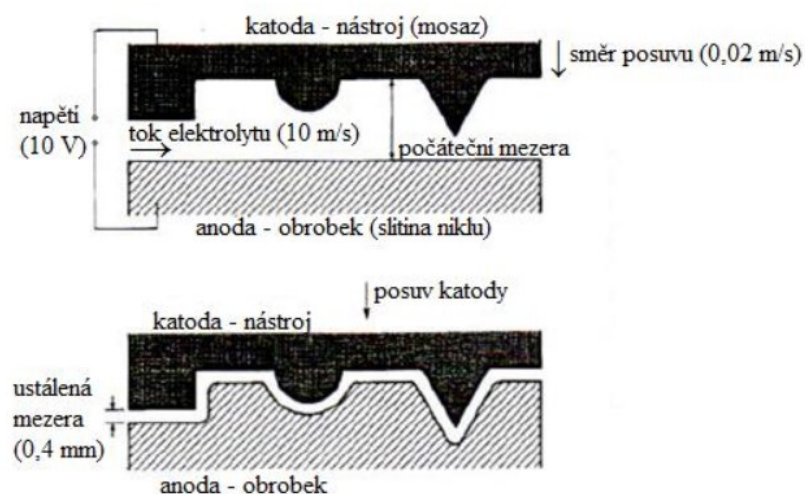
- Nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobené plochy,
- nutnost ponoření obrobku do dielektrika v průběhu obrábění,
- nutnost odvádět nebezpečné výpary vznikající při obrábění,
- nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů. [1,4]

Nejčastější využití technologie EDM:

- Elektroimpulzní obrábění,
- elektrojiskrové řezání, hloubení a děrování -výroba mikrootvorů,
- elektrojiskrové leštění,
- elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou,
- elektrokontaktní obrábění. [6]

1.2 Elektrochemické obrábění (Electro-Chemical Machining, ECM)

Tato metoda patří k beztržiskovému obrábění a její hlavní podstatou je elektrolyza. Jedná se o elektrochemické přeměny mezi obrobkem (anoda) a nástrojem (katoda), které jsou společně ponořeny do elektrolytu (obr. 1.2.1). Na tyto dvě elektrody je přiveden velký stejnosměrný proud. Ten způsobí pohyb kladných kationtů obrobku ke katodě a zároveň pohyb záporných aniontů elektrolytu k anodě. Tady ionty předají svůj záporný nebo kladný náboj. Potom se přemění na neutrální molekuly nebo atomy, které se vyloučí na povrch katody nebo se rozpustí (chemicky reagují s materiálem). Při procesu dochází k úběru hmoty obrobku (anody), aniž by docházelo k podstatné ztrátě hmoty nástroje (katody). [1,2,3]



Obr. 1.2.1 Materiál a elektroda před a po procesu [2]

Na obrázku je znázorněno, jak tento proces probíhá. Celé obrábění je rychlé a mohou se vyrábět tvarově složité obrobky. Metoda je vhodná pro velkosériovou výrobu. [1,2]

Výhody:

- Elektrody nepodléhají opotřebení,
- opracovaný povrch má vysokou kvalitu,
- obráběné obrobky jsou bez otřepů,
- při procesu nedochází k tvorbě tepelně ovlivněné zóny. [4]

Nevýhody:

- Dochází ke snížení meze únavy obráběného materiálu,
- potřebné odstranění kalů a elektrolytu po obrábění. [4]

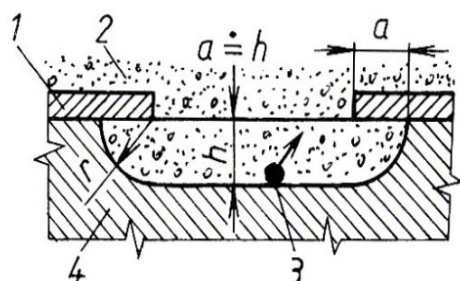
Nejčastější využití metody ECM:

- Odstraňování otřepů a dělení materiálu,
- hloubení otvorů malých průměrů,
- hloubení dutin a zápustek u forem,
- broušení, lapování a honování,
- leštění a povrchové značení. [6]

1.3 Chemické obrábění (Chemical Machining, CM)

Podstatou technologie chemického obrábění (CM) je pomocí silného chemického činidla (leptadla) odleptat řízeně vrstvy materiálů obrobku (leptání). Princip CM je znázorněn na obr. 1.3.1. Mezi chemická činidla patří louhy a kyseliny. Pomocí mikroskopického elektrochemického působení na obrobek se odstraní přebytečný materiál, jako je tomu

například u chemického rozpouštění kovů nebo u koroze. Části obrobku, které nemají být odleptány, jsou chráněny tvz. maskou (povlakem). Tento proces je levný. CM lze rozdělit podle principu na leptání, chemické rozměrové leptání, fotochemické obrábění, anizotropní a selektivní leptání a termické odstraňování otřepů. [1,4,11]



1 – maska, 2 – nástroj (chemická leptací látka),
3 – odebrané (odleptané) částice materiálu
obrobku, 4 – obrobek

Obr. 1.3.1 Princip chemického obrábění [1]

Výhody:

- Doba leptání nezávisí na celkové ploše obráběného povrchu,
- nezpůsobuje vznik vnitřních pnutí,
- bezsilová metoda,
- možnost obrábět složité tvary a vytvářet jemné detaily. [4]

Nevýhody:

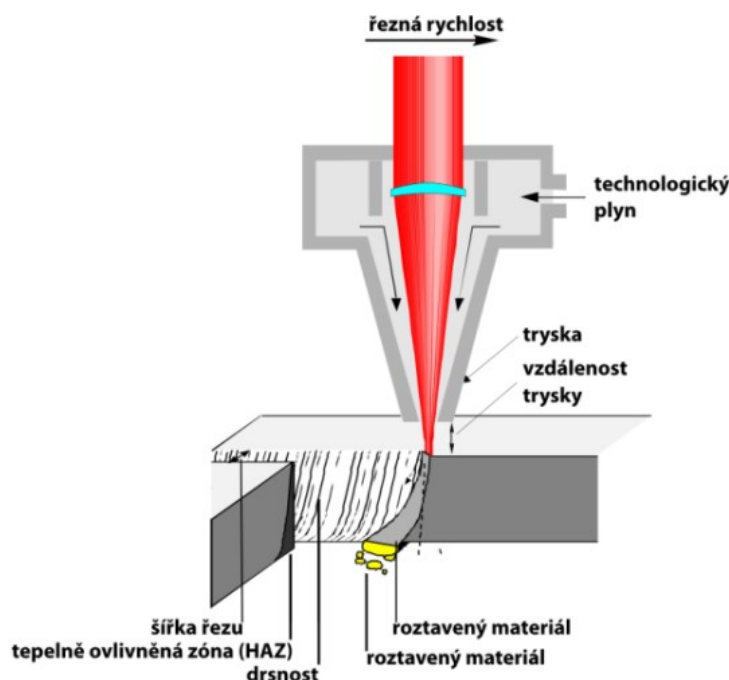
- Rozměry dílce jsou limitovány rozměry nádrže, do které se ponoří,
- těžko kontrolovatelné podřezávání,
- limitovaná tloušťka obrobku. [4]

Nejčastější užití technologie CM:

- Chemické obrábění,
- odstraňování otřepů. [6]

1.4 Obrábění laserem (Laser Beam Machining, LBM)

Podstatou technologie obrábění laserem (LMB) je proměna úzkého svazku světelné energie na energii tepelnou, která způsobí odtavení materiálu v místě obrábění (obr. 1.4.1). Zkratka slova LASER, doslovně znamená zesílení světla pomocí vybuze­né emise záření (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Tento proces pracuje na principu indukované emise (vynuceného záření), která je dodáním vnější energie vyvolána v aktivním prostředí laseru. Elektron obíhající jádro atomu pomocí vnějšího zásahu (např. zářením) přijme určitou dávku energie a vystoupí na vyšší oběžnou dráhu. Rovnováha sil v atomu spolu s dodáním další energie přinutí elektron vrátit se zpět na nižší energetickou hladinu (svou původní oběžnou dráhu), a tím vyzáří přijatou energii do prostoru ve formě fotonu. Fotony potom reagují s dalšími elektrony a spouštějí tzv. stimulovanou emisi fotonů se stejnou frekvencí a fází. V rezonátoru (zrcadla) je umístěno aktivní prostředí, fotony se odrážejí a opět procházejí aktivním prostředím. Tím se podporuje vynucená emise a dochází k dalšímu zesílení toku fotonů. Výsledný světelný svazek opouští laser přes polopropustné zrcadlo. Díky neustálému vývoji vzniklo několik druhů laserů a to často i na odlišných fyzikálních principech. Podle typu aktivního prostředí je můžeme rozdělit na plazmatické, pevnolátkové, polovodičové, plynové a kapalinové. Podle časového režimu provozu laseru na kontinuální a impulzní. [1,12]



Obr. 1.4.1 Princip obrábění laserem [13]

Výhody:

- Vysoká rychlost a přesnost obrábění,
- konzistentní paprsek,
- snadná příprava podkladů k obrábění (CAD/CAM) – tzv. In-Time Machining,
- tvarové obrábění, začátek řezu je možný i bez předchozího navrtání,
- možnost kusové výroby. [4]

Nevýhody:

- Vznik plynů, výparů – nutný odtah z pracoviště,
- drahá zařízení,
- bezpečnostní rizika. [4]

Nejčastější užití technologie LBM:

- Svařování,
- vrtání,
- gravírování. [6]

1.5 Obráběním plazmou (Plasma Beam Machining, PBM)

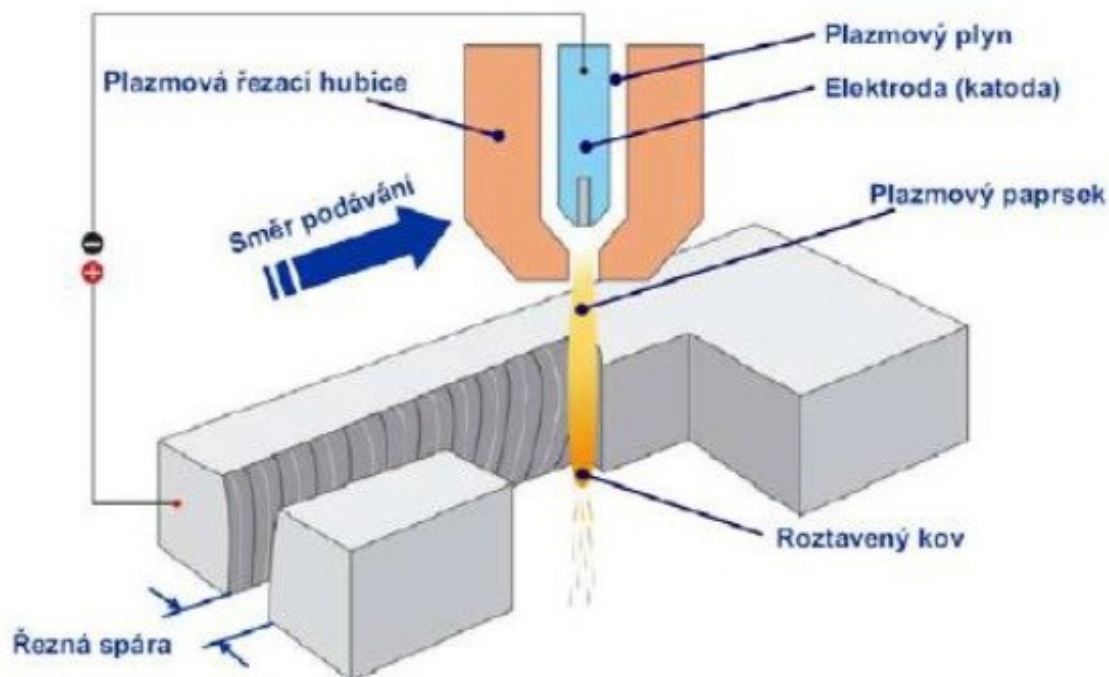
Technologie obrábění plazmou (PBM) je založena na odpařování a rozprašování materiálu pomocí paprsku plazmy (obr. 1.5.1). Paprsek plazmy je elektricky vodivý stav plynu, obsahující pozitivně nabitě ionty, neutrální atomy a volné elektrony. Teplota plazmy dosahuje extrémních hodnot a to mezi 10 až 30 tis. °C. PBM se nejčastěji využívá na řezání ocele a jiných kovových elektricky vodivých materiálů. Pro ovlivnění vlastností paprsku a zvýšení přesnosti řezání se k ústí plazmové trysky mohou přivádět další pomocné plyny. [1,4,19]

Dělení plazmových hořáků:

- *hořák s netransferovým obloukem* – zde tvoří anodu těleso hořáku.
- *hořák s transferovým obloukem* – úlohu anody zde tvoří obrobek. Oblouk pak hoří mezi katodou (elektroda) a anoda (obrobek). [6]

Dělení použitých plynů:

- *fokusační plyny* – zaostřují a zužují paprsek při výstupu z trysky hořáku: Ar, Ar + H₂, Ar + N₂, N₂,
- *ochranné plyny* – obklopují paprsek a oblast tavení materiálu a chrání je před účinky vnější atmosféry
- *plazmové plyny* – jsou přiváděny přímo do hořáku, kde jsou ionizovány: Ar, Ar + H₂, He, N₂, CO₂, vzduch. [6]



Obr. 1.5.1 Princip obrábění plazmou [20]

Výhody:

- Levná zařízení,
- malá tepelně ovlivněná oblast v místě řezu (do 1 mm),
- struktura materiálu v místě řezu je jemná. [4,6]

Nevýhody:

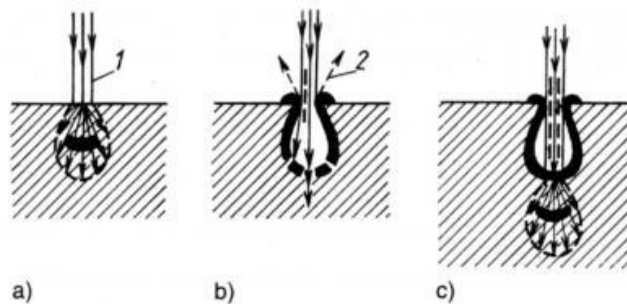
- Tepelně ovlivněná zóna,
- není možné ovlivnit povrch obrábění,
- malé spektrum materiálů vhodných pro obrábění,
- vznik velkého množství emisí, hluk. [4,6]

Nejčastější využití technologie PBM:

- Ohřev povrchu před soustružením,
- řezání,
- soustružení, frézování a hoblování. [6]

1.6 Obrábění elektronovým paprskem (Electron Beam Machining, EBM)

Podstata technologie obrábění elektronovým paprskem (EBM) je založena na přeměně kinetické energie urychleného proudu elektronů na tepelnou energii. Paprsek vniká do materiálu pouze do určité hloubky, pak se pohyb elektronů zastaví. V místě dopadu elektronového paprsku vzniká tepelná energie, která způsobuje erupční odpařování materiálu (obr. 1.6.1). Výpary, které vznikají při obrábění, jsou zionizovány a tím způsobí nové zaostření elektronového paprsku do pracovního místa. [1,18]



a) vnik elektronů do materiálu, b) erupční odpařování materiálu, c) opětový vnik elektronů do materiálu

1 – elektronový paprsek, 2 – páry odpařeného kovu

Obr. 1.6.1 Princip obrábění elektronovým paprskem [18]

Výhody:

- Použitelné prakticky na všechny druhy materiálů,
- vysoká účinnost,
- rychlé a přesné vychylování paprsku elektronů. [4]

Nevýhody:

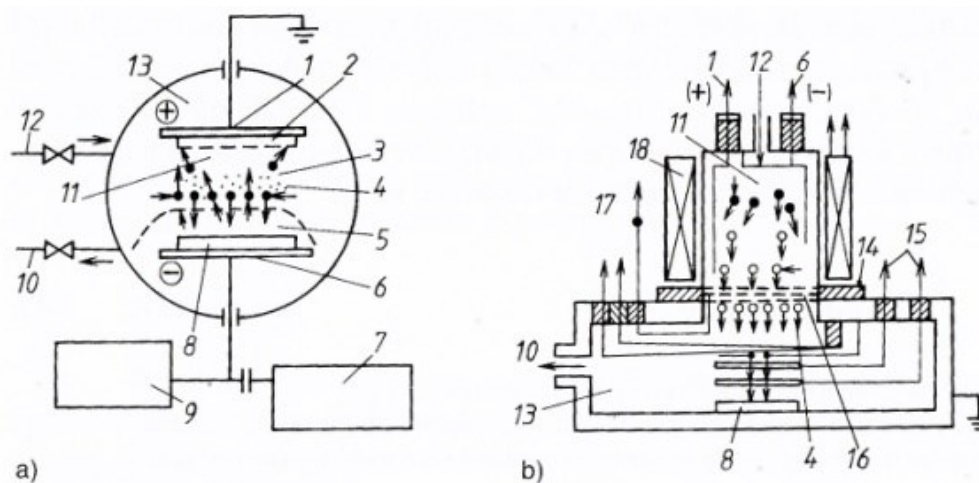
- Pracovní cyklus ve vysokém vakuu,
- vyskytují se problémy při opracování elektricky nevodivých materiálů (izolantů a diamantu,
- vznik škodlivého RTG záření. [4]

Nejčastější využití technologie EBM:

- Svařování, pájení,
- vrtání dlouhých děr již od průměru 0,015 mm,
- řezání,
- kalení, legování,
- při výrobě čipů. [6]

1.7 Obrábění iontovým paprskem (Ion Beam Machining, IBM)

Principem obrábění iontovým paprskem je využití kinetické energie iontů. Obráběný materiál je umístěn ve vakuu, kde na povrch dopadají svazky iontů (zdrojem iontů je většinou argon). Obrábění iontovým paprskem musí probíhat přes krycí masku podobně jako u chemického obrábění. Názorné schéma iontového obráběcího zařízení je na obr. 1.7.1. Obrábění iontovým paprskem lze rozčlenit na konkrétní technologické operace: např. implantace (Ion Beam Implantation Process), naprašování (Ion Beam Sputter Deposition), frézování (Ion Beam Milling) a strukturování (Ion Beam Texturing). [9]



a) anizotropní leptání polovodičů,

b) iontové leptání

1 – anoda, 2 – depozitní vrstva, 3 – elektrony, 4 – ionty, 5 – krycí maska, 6 – katoda, 7 – oscilátor, 8 – obrobek, 9 – voltmetr, 10 – vývěva, 11 – plazma, 12 – přívod argonu, 13 – vakuum, 14 – izolátor, 15 – snímač iontů, 16 – elektroda, 17 – potlačení elektronů, 18 – indukční cívky

Obr. 1.7.1 Schéma iontového obráběcího zařízení [9].

Výhody:

- Nevytváří se teplo, nevzniká mechanická deformace povrchové vrstvy,
- obrobený povrch má vysokou kvalitu,
- lze obrábět téměř všechny materiály
- nezanechává žádné zbytkové napětí. [1,4,6]

Nevýhody:

- Nutnost aplikace ve vakuu,
- vysoká cena potřebného zařízení. [4]

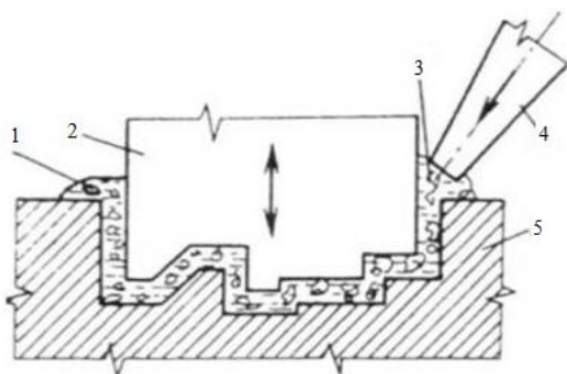
Nejčastější využití metody IBM:

- Vytváření matric při výrobě integrovaných obvodů,
- čištění a hlazení povrchu. [6]

1.8 Obrábění ultrazvukem (Ultrasonic Machining, USM)

Podstatou této technologie je obrušování obrobku pomocí jemného abrazivního brusiva (obr. 1.8.1), které je unášeno kapalinou a je rozkmitáno vysokou frekvencí nástroje (20 – 30 kHz). Brusivo je přivedeno mezi nástroj a obrobek. Pomocí nárazů zrn brusiva do materiálu obrobku dochází k narušení povrchu a zrna tak odstraňují malé části obrobku. Technologie umožňuje obrábět materiály velmi přesně až do zrcadlového lesku. [1,6,7]

Mezi tuto technologii lze zařadit jako samostatnou část také rotační ultrazvukové obrábění (RUM). Rozdíl mezi USM a RUM je v pohybu diamantového nástroje při vzájemném pohybu s obrobkem, který vykonává axiální rotační a axiální vysokofrekvenční pohyb. Významnou roli při tomto procesu hraje kavitační opotřebení materiálu. [1,4]



- 1 - kapalina, 2 - nástroj, 3 - brousící zrna,
4 - přívod brousících zrn a kapaliny,
5 - obrobek.

Obr. 1.8.1 Princip obrábění ultrazvukem (6)

Výhody:

- Žádné chemické ani tepelné ovlivnění obrobku,
- lze obrábět křehké a tvrdé materiály i elektricky nevodivé,
- vysoká kvalita obrobené plochy. [7,8].

Nevýhody:

- Nelze obrábět měkké materiály a plasty
- obrábění na bocích obrobku má výrazně menší intenzitu. [6]

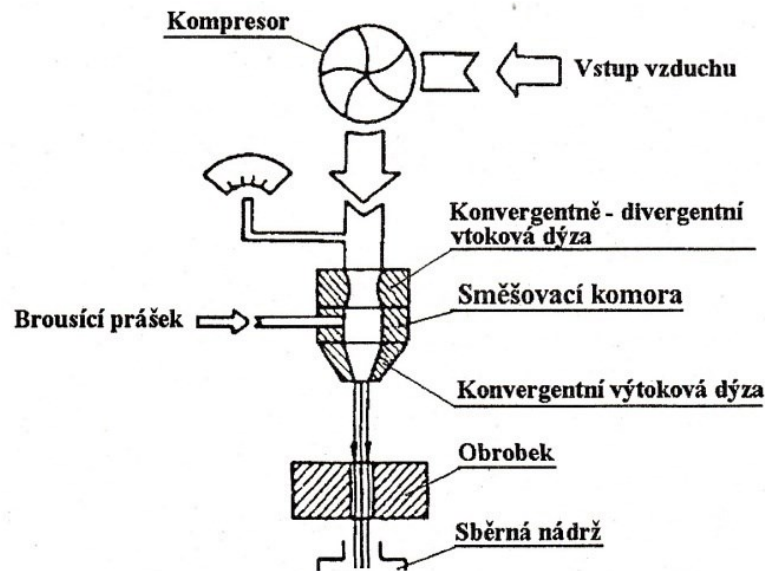
Nejčastější užití technologie USM:

- Hloubení děr různých tvarů a hloubek,
- zpevňování povrchu,
- řezání materiálu,
- svařování plastů (bez použití abrazivní suspenze),
- soustružení, honování a superfinišování,
- svařování kovů (bez použití abrazivní suspenze). [6]

1.9 Obrábění proudem vzduchu s abrazivem (Abrasive Jet Machining, AJM)

Tato technologie je založena na přeměně kinetické energie abraziva při dopadu na obrobek (obr. 1.9.1). Proud vzduchu, který obsahuje brusné částice (abrazivo) má vysokou rychlost a odebrává materiál mechanickým nárazem. Mezi tuto metodu lze zařadit i technologii opracování proudem vzduchu (AFM). Mezi hlavní technologické parametry tohoto typu obrábění patří: velikost částic, vzdálenost mezi nástrojem a obrobkem, tlak vzduchu, úhel dopadu proudu vzduchu na materiál a velikost (rychlost) posuvu trysky nad materiálem. [1,4,17]

Hlavní částí technologie je vysokotlaký kompresor, který přivádí stlačený vzduch do směšovací komory. Zde se mísí s brusným práškem – abrazivem (nejčastěji karbid křemíku nebo oxid hliníku). Odtud je pak stlačený vzduch i s abrazivem tryskán přes trysku na materiál. [6]



Obr. 1.9.1 Princip obrábění proudem vzduchu s abrazivem [17]

Výhody:

- Lze obrábět tvrdé materiály,
- levné médium,
- nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu. [1,4,17]

Nevýhody

- Nízká rychlost obrábění,
- rozptýl paprsku. [1,4]

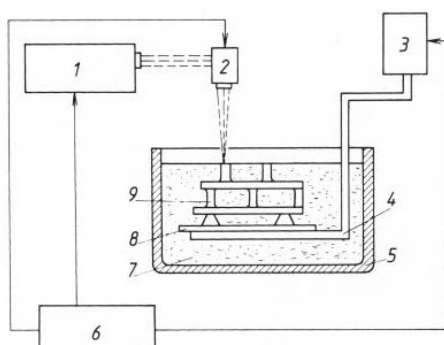
Nejčastější užití technologie AJM:

- Výroba rýh a drážek v elektrotechnice,
- odstraňování otřepů. [6]

1.10 Stereolitografie

Tato technologie spadá pod skupinu označovanou jako Rapid Prototyping. V češtině ji známe pod názvem 3D tisk. Podstatou stereolitografie je výroba 3D geometrického modelu např. strojní součástí, původně vytvořeného v CAD programu nebo odměřeného prostorovým skenerem. Takto vytvořený model je převeden do příslušného formátu (nejčastěji STL) a data jsou pak načtena do softwaru pro Rapid Prototyping. Následně je model pomyslně rozřezán příčnými řezy s definovaným nastavením vzdáleností jednotlivých vrstev. Potom se navrhne podpurná konstrukce pro vytvoření modelu a oddělení modelu od nosné desky. Při tisku vlastního 3D modelu je materiál po vrstvách přidáván na součást modelu. Model je pro výrobu rozdělen na velké množství vrstev, jejichž tloušťka je v řádech setin až desetin milimetru. Vyrábět lze takto značně složité geometrické předměty i s vnitřními uzavřenými prostory (obr. 1.10.1). [26]

Metoda 3D tisku slouží nejen k výrobě forem a nástrojů vytvořením prostorových modelů součástí, ale také ke kontrole designu při vývoji obrobku, k ověření funkčnosti a k optimalizaci výrobků. [26]



- 1 – laser, 2 – pracovní hlava laseru,
3 – systém pro posuv nosné desky,
4 – nosná deska, 5 – pracovní vana,
6 – CNC řídicí systém, 7 – fotopolymer,
8 – podložka, 9 – vyráběná součást

Obr. 1.10.1 Schéma zařízení pro technologii stereolitografie [26]

Výhody:

- Lze vytvářet velké modely s dobrými fyzikálními vlastnostmi. [27]

Nevýhody:

- Velká pořizovací cena zařízení. [27]

Nejčastější užití stereolitografie:

- vytváření forem a nástrojů (26)

2 Obrábění vodním (Water Jet Machining, WJM) a abrazivním vodním paprskem (Abrasive Water Jet Machining, AWJM)

Protože cílem mé diplomové práce je kvalita řezných ploch po aplikaci vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku, věnuji této problematice samostatnou kapitolu, i když by měla být zařazena do kapitoly 1 – Nekonvenční technologie obrábění.

Podstatou této technologie je dopad vodního proudu malého průměru, pohybujícího se vysokou rychlostí (tzv. vodní paprsek, WJ) nebo vodního proudu s přidanými abrazivními částicemi (tzv. abrazivní vodní paprsek, AWJ) na obráběný materiál, čímž se materiál poruší. [1]

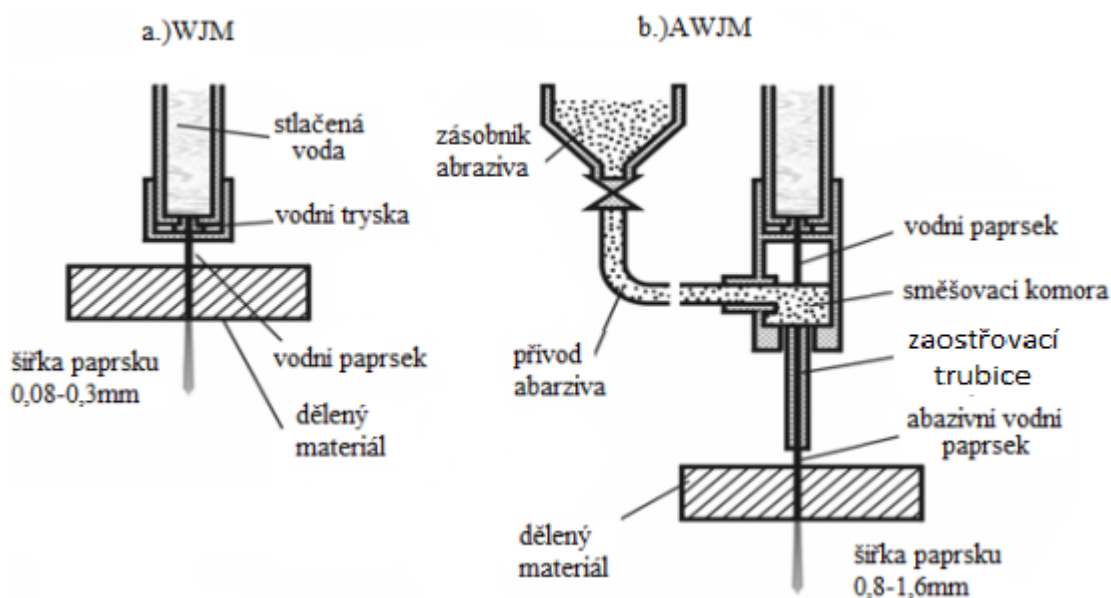
Po průchodu vody o vysokém tlaku (až 600 MPa, běžně 400 MPa) úzkým otvorem (vodní tryskou) vzniká vodní paprsek. Tím dojde k přeměně tlakové energie vody na kinetickou energii paprsku. Technologie vodního paprsku (WJ) je vhodná k čištění a odstraňování povrchových vrstev a k řezání měkkých materiálů (např. papír, potraviny, guma, plasty, dřevo, tenké plechy). Když se přidá za vodní trysku tzv. směšovací komora, dojde ke smíšení abrazivních částic s vodním paprskem a vzniká abrazivní vodní paprsek (AWJ). Tento paprsek je schopen obrábět téměř jakýkoliv materiál (obr. 2.1). Další variantu vodního abrazivního paprsku představuje abrazivní suspenzní paprsek (ASJ), který vznikne smícháním abrazivních částic s vodou ještě před jejím natlakováním. [1,4,9,21,41]

Obrábění vodním paprskem (WJM) a abrazivním vodním paprskem (AWJM) tvoří velkou část z mnoha dalších aplikací technologie vysokorychlostního kapalinového paprsku. Tento způsob obrábění má širokou škálu uplatnění v různých oborech, vodní paprsek pracuje s různými tlaky vody, různými objemovými průtoky a pro každou aplikaci existují speciální trysky. [1,21,41]

Výhody:

- Technologii lze snadno začlenit do automatizovaného systému výroby,
- možnost CNC řízení,
- vysoká flexibilita i při složité geometrii řezu,

- proces je bezprašný, nevznikají žádné plyny nebo páry,
- při vhodně zvolených parametrech paprsku velmi kvalitní řez bez nutnosti dalšího opracování,
- obrobené (řezné) hrany nevykazují tepelnou ani mechanickou deformaci (tvz. studený řez),
- dobrá energetická účinnost (až 80 %),
- malé ztráty materiálu v důsledku úzkého řezu,
- možnost řezání pod hladinou vody,
- nedochází k poškození případných povrchových úprav materiálu,
- v obrobené ploše nezůstávají zbytková napětí a mikrotrhliny,
- možnost řezání vlnitých a sendvičových materiálů,
- přesné čištění a leštění povrchů těžkoobrobitelných materiálů. [1,4,22]



Obr. 2.1 Princip obrábění a) vodním paprskem (WJM), b) vodním paprskem s abrazivem (AWJM) [6]

Nevýhody:

- Nelze řezat kalené sklo,
- řezaný materiál musí snášet přímý kontakt s vodou,
- vysoká pořizovací cena zařízení,
- zaoblení vnitřních rohů je dáno průměrem paprsku. [1,4]

Nejčastější užití technologie WJM a AWJM:

- Řezání tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů (titan, wolfram, tantal, slinuté karbidy, atd.),
- řezání kompozitů, skel, vláknitých materiálů, plastů, azbestu, kůží, gum,
- chemický průmysl: dělení výbušných materiálů,
- potravinářský průmysl: dělení potravin v syrovém a zmraženém stavu. [6]

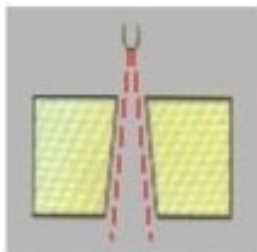
Paprsky lze podle způsobu generování dále členit na paprsky kontinuální (většina v současnosti používaných paprsků na řezání a čištění), paprsky pulzující (doposud ne příliš rozšířená, ale velmi slibná varianta vhodná zejména k úpravě a přípravě povrchů a k čištění, je několikanásobně účinnější než kontinuální paprsky) a paprsky kavitační (kavitační paprsek je kontinuální paprsek s obsahem kavitačních bublinek, po dopadu paprsku dochází k lokálnímu porušení materiálu destrukční kavitační silou). [1,4]

2.1 Vznik úkosu:

U technologie WJM a AWJM ve většině případů vzniká u obrábění (řezání) určitý úkos, který má obvykle kolem $1 - 1,5^\circ$. Na rozsah a vznik úkosu má velký vliv množství abraziva, tvar řezu typ, řezaného materiálu apod. [23]

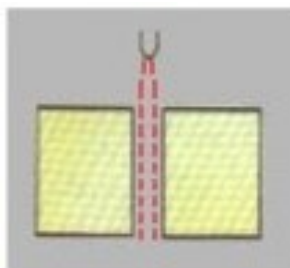
Vznikají tyto případy:

Při velmi pomalém řezu nebo řezu v měkkém materiálu vzniká tento případ: Paprsek stihne vytvořit svou přirozenou kuželovitou stopu. [23]



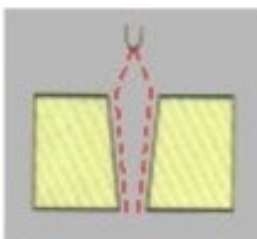
Obr. 2.1.1 Rozšiřující se řezná spára [23]

Další případ je optimální rovnováha mezi tloušťkou materiálu, rychlostí řezu, a jeho odolností. Paprsek je udržen po celou dobu obrábění ve válcovém tvaru. Žádný úkos zde nevzniká. [23]



Obr. 2.1.2 Přímá řezná spára [23]

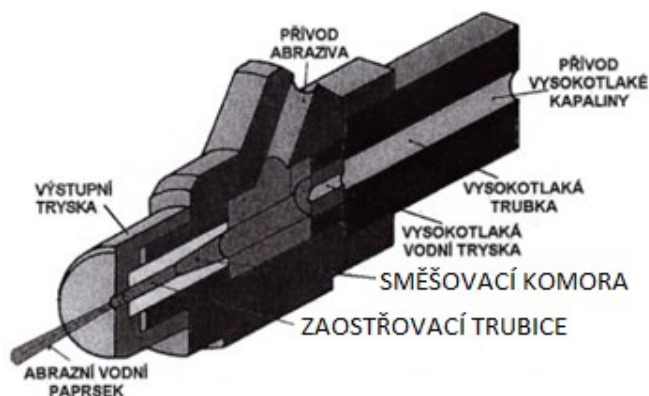
Při velmi rychlém řezu anebo řezu v tvrdém materiálu dochází k tomuto úkosu: Vodní paprsek zde nestihne vytvořit svou kuželovitou stopu. Řez se směrem dolů uzavírá. [23]



Obr. 2.1.3 Zuzující se řezná spára [23]

2.2 Aplikace WJM a AWJM

Technologie vysokorychlostního vodního paprsku (WJ) i abrazivního vodního paprsku (AWJ) se používají při různých technologických operacích. Nejčastější aplikace je řezání a vrtání různých materiálů. Méně se využívá pro soustružení, frézování, gravírování a leštění. Velkou část také zaujímá čištění (otryskávání) a odstraňování povlaků a nánosů. Některé aplikace vyžadují odstraňování otřepů, tvorbu drážek a úkosů. [1,4]



Obr. 2.2.1 Řezací hlavice [4]

Nejčastější používané abrazivo pro vytváření abrazivního vodního paprsku je granátový písek vhodné zrnitosti. Méně se využívá olivín (Mg_2SiO_4), případně korund (Al_2O_3). Je možno využívat i krystalky ledu, soli, či cukru pro řezání např. zmražených potravin. Do směšovací komory v řezné hlavici je abrazivo přisáváno podtlakem. Velikosti abrazivních zrn podle mezinárodní klasifikace MESH udává tabulka. [1,4,24]

Velikost abrazivních částic

MESH	Velikost otvoru síta [mm]
16	1,190
18	1,000
35	0,500
60	0,250
80	0,177
100	0,149
140	0,105
200	0,074
400	0,037

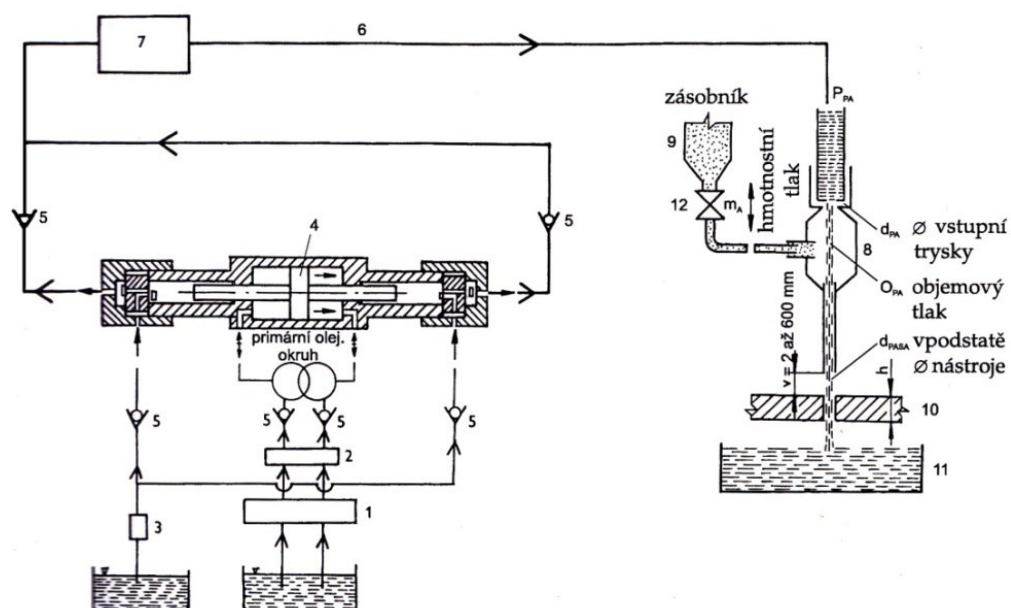
Tab. 2.2.1 Velikost abrazivních částic [1]

2.3 Popis zařízení na řezání vodním paprskem

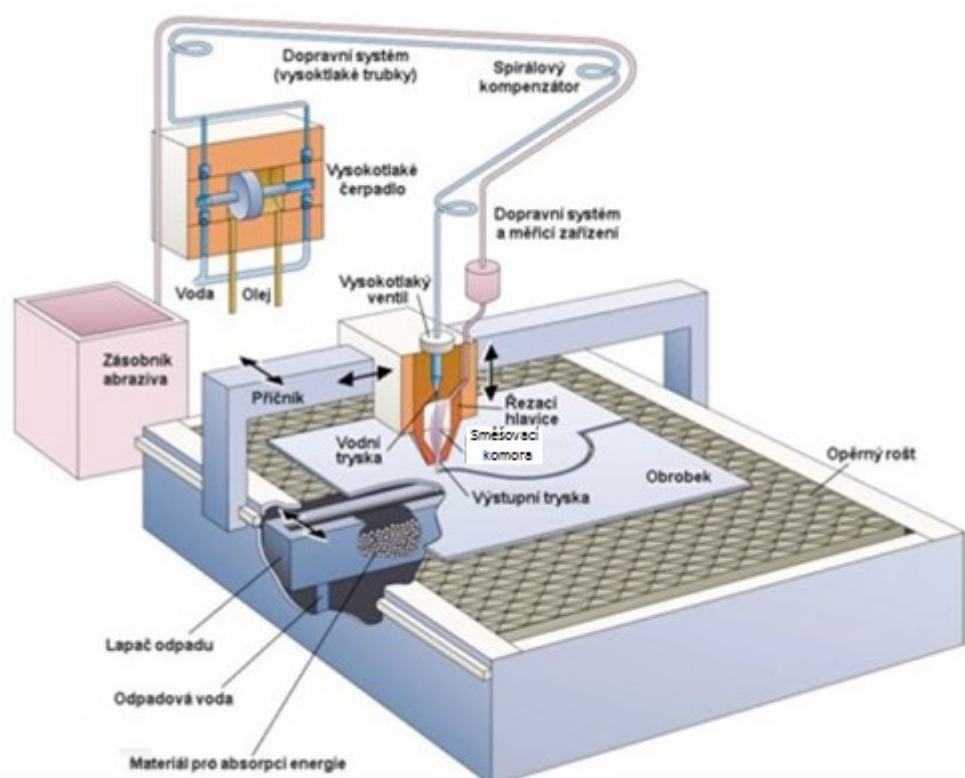
Přístroj se skládá ze dvou okruhů (obr. 2.3.1.). Primární okruh tvoří vysokotlaké olejové čerpadlo (pozice č. 1), které dodává pracovní tlak. Olej je tlačén přes uzavírací ventil (pozice č. 2), který umožňuje okamžité přerušení průtoku. Ten pak dále pokračuje do zesilovače tlaku – multiplikátoru (pozice č. 4), který dodává olej střídavě na obě strany pístu. Olej způsobí tlak na plochu velkého pístu, který je spojen se dvěma pístnicemi o daleko menším průměru, na jejichž koncích se vytvoří mnohonásobně větší tlak, než je tlak oleje. Toto zvětšení závisí na poměru velikosti průměru velkého pístu k průměru malé pístnice. Nízkotlaká voda je přiváděna do tlakových komor obou pístnic přes filtrační jednotku (pozice č. 3). [1,3]

Sekundární, vysokotlaký okruh obsahuje mimo jiné zpětné ventily (pozice č. 5) a vysokotlaký akumulátor (pozice č. 7). Akumulátor má za úkol tlumit rázy ve vysokotlaké vodě, které vznikají postupným vypouštěním vysokotlaké vody z jedné a druhé tlakové komory. Vysokotlaká voda o konstantním tlaku je z akumulátoru vedena potrubím (pozice č. 6) do vodní trysky, kde pak vzniká vodní paprsek. Ten dále vstupuje do směšovací komory (pozice č. 8), kde se mísí s abrazivem, a pokračuje do zaostřovací trubice. Z trubice vytéká abrazivní vodní paprsek nadzvukovou rychlostí. Pod řeznou hlavici je umístěn stůl s obráběným materiálem (pozice 10). Součástí stolu musí být i vodní nádrž, která utlumí zbytkovou energii paprsku po řezání (pozice 11). [1,3]

V zásobníku je umístěno abrazivo (pozice č. 9), které je přiváděno přes ventil s klapkou a mžikovým přepouštěním (pozice 12) do speciálně tvarované otěruvzdorné směšovací komory (pozice č. 8). Schéma zařízení pro řezání vodním a abrazivním vodním paprskem je znázorněno na obr. 2.3.2. [1,3]



Obr. 2.3.1 Schéma řezání abrazivním vodním paprskem [3]



Obr. 2.3.2 Zařízení pro řezání vodním a abrazivním vodním paprskem [25]

3 Porovnání jednotlivých nekonvenčních metod [1,4,14,15]

Metoda		Elektrojiskrové řezání	Řezání laserem	Plazmové řezání	Řezání elektronovým paprskem	Řezání abrazivním a vodním paprskem
Hodnotící faktor	Jednotky	EDM	LBM	PBM	EBM	WJM, AWJM
Max. tloušťka materiálu	[mm]	0,02 až 400	až 50 hospodárné okolo 7	i přes 100 slitiny Al a Cu až 150	0,5 až 1 (kovy 2 až 3)	0,1 až 200 (dělicí řez)
Šířka řezného nástroje (paprsku)	[mm]	0,03 až 0,35	0,02 – 0,2	–	–	0,1 až 1,5 WJM 0,8 až 2,5 AWJM
Šířka řezu	[mm]	Ø drátu + 0,02 až 0,05	0,02 až 1	Až 7 nahoře 4,5 dole	0,01	0,2 až 2,5
Rychlost posuvu	[mm · min ⁻¹]	úběr materiálu 8 až 300 mm ² · min ⁻¹	až 8000	50 až 6000	až 1200	15 až 1500
Přesnost rozměrů	[μm]	13 (poloha drátu ±1° ± 1 μm ±3° ± 3 μm)	25 až 75	750 až 2500	25 až 75	± 100 až ± 500
Parametr drsnosti povrchu Ra	[μm]	0,08 až 0,3 běžně 0,7 až 1,3	3,6 až 12	0,8 až 3,6	3,6 až 6,3	2,5 až 12
Tepelné ovlivnění materiálu	[mm]	0,4 až 1	0,05 až 0,2	0,25 až 1,25 (při chlazení trhliny až do 1,6)	0,25	Není

4 Hodnocení topografie povrchu

Technické povrchy nejsou nikdy geometricky dokonale rovinné. Kvůli tomu se skutečný povrch obráběné součásti liší od jejího předepsaného geometricky dokonalého tvaru (předepsaný tvar je určen technickou dokumentací nebo výkresem). Odchylky mohou vzniknout na povrchu a jsou tvořeny prohlubněmi a výstupky na celé ploše. Jsou důsledkem působení vnějších sil prostředí. Při jakémkoliv obrábění není struktura povrchu ve všech směrech stejná. [1,30,31]

Rozlišujeme čtyři druhy nerovností:

- Mimořádné nerovnosti (makronerovnosti), jedná se o trhliny, náhodné nerovnosti odlitků a výkovků, nepravidelné rýhy,
- vlnitost povrchu, jedná se o periodicky se opakující nerovnosti, které vznikají hlavně při obrábění chvěním stroje, nástroje a obráběné součásti,
- drsnost povrchu (mikronerovnost), pravidelně se opakuje a je podmíněna konkrétním technologickým pochodem,
- na mikronerovnost se ještě superponují ultramikronerovnosti, které jsou dány snahou dosáhnout nejstabilnějšího stavu krystalického povrchu. [31]

Ve struktuře povrchu lze rozlišit:

- *Příčnou drsnost* (drsnost v příčném profilu kolmém na řezný pohyb),
- *podélnou drsnost* (drsnost v podélném profilu ve směru řezného pohybu. [30]

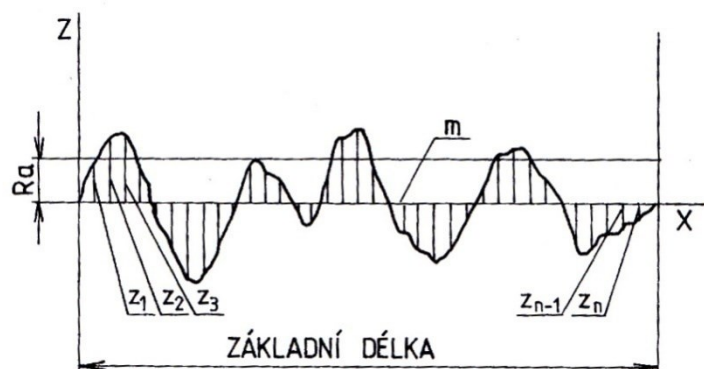
V technické praxi se k hodnocení struktury povrchu používá norma ČSN EN ISO 4287. Tato norma zavádí mimo jiné tyto termíny struktur povrchu:

Nejvyšší výška profilu R_z – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. [30,32]

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| \cdot dx,$$

kde Z je hodnota absolutní úchylky i -tého bodu profilu od střední čáry m profilu – viz obr. 4.1 [30,32]



Obr. 4.1. Průměrná aritmetická úchylka R_a [30]

4.1 Hodnocení kvality řezné plochy pro AWJM:

Pro hodnocení kvality plochy řezané abrazivním vodním paprskem se používají tzv. stupně kvality, které jsou označovány Q1 až Q5, přičemž Q5 označuje nejlepší a Q1 nejhorší možnou plochu. Obrázek 4.1.1 ukazuje stupně kvality po obrábění AWJM. Tabulka 4.1.1 blíže popisuje jednotlivé stupně kvality. [1]



Obr. 4.1.1 Stupně kvality řezu AWJM [1,23]

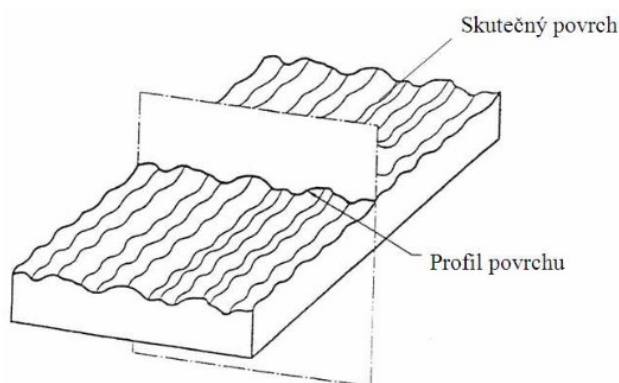
Tab. 4.1.1 Orientační popis stupňů kvality řezu [1,33]

Stupeň	Druh řezu	Drsnost Ra	Tvarová přesnost [mm]	Úkos
Q 5	Nejlepší	3,2	$\pm 0,1$	Minimální
Q 4	Kvalitní	3,2 – 6,3	$\pm 0,1$	Mírný
Q 3	Střední	4,0 – 12,5	$\pm 0,15$	Dle typu materiálu
Q 2	Hrubý	4,0 – 25	$\pm 0,2$	Dle typu materiálu
Q 1	Dělicí	6,3 – 40	$\pm 0,2$	Výrazný úkos

Redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu se řeší problém posuzování nerovnosti (struktury povrchu). V rovině řezu se získá profil, který je základním zdrojem informace pro posuzování struktury povrchu. [31]

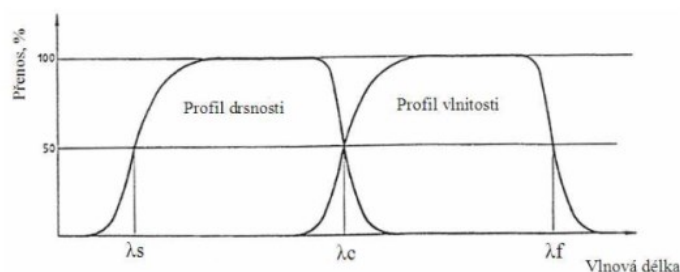
Dosud se v technické praxi běžně používá k jejich hodnocení zjednodušená (normalizovaná) metoda využívající profil nerovnosti vzniklý v rovině řezu (2D) stanovený normativně: [31]

- ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. [31]
- ČSN EN ISO 4288: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. [31]



Obr 4.1.2 Profil povrchu [32]

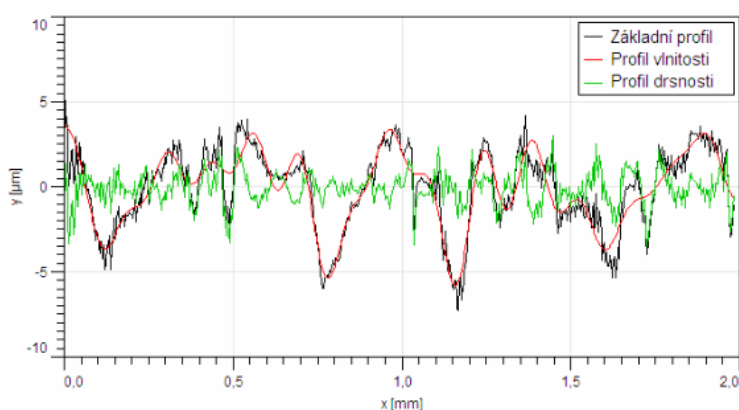
Při vlastním hodnocení sejmutého profilu formou číselných hodnot parametrů povrchu se uplatňují základny tvořené použitým typem filtru, který slouží k oddělení frekvenčních složek nerovností profilu. Jedná se o složky signálu různých vlnových délek, příslušející základnímu profilu, profilu vlnitosti povrchu a drsnosti povrchu. [31,32]



Obr. 4.1.3 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti. [31]

Filtr profilu – filtr rozděluje profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky:

- λ_s filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu,
- λ_c filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti,
- λ_f filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu. [31]



Obr. 4.1.4 Znázornění signálu různých vlnových délek, příslušející základnímu profilu, profilu vlnitosti a drsnosti povrchu. [31]

- **Základní profil** (P profil – primary profile) – profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny,
- **profil drsnosti** (R profil – roughness profile) – profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c ,
- **profil vlnitosti** (W profil – waviness profile) – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c . [31]

4.2 Měřicí technika

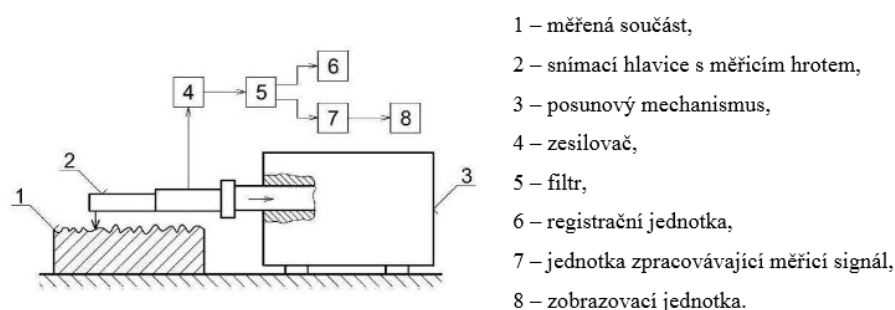
Ještě před několika málo lety převládala optická, tzn. bezdotyková dimenzionální měřicí technika měřících mikroskopů a měřících projektorů, jejichž základní princip zůstal nezměněn od vzniku profilprojektoru. Automatické měření geometrických prvků bylo možné pouze u dvourozměrných dílců, a to metodou využívající procházející světlo. Z důvodu své všestrannosti nahradila souřadnicová měřicí technika různé jednoúčelové měřicí stroje k měření průmyslově vyráběných dílců a dosáhla vysokého významu. [34]

Předpokladem pro moderní optickou souřadnicovou měřicí techniku jsou dnes metody zpracování obrazu a laserové senzory, které byly vyvinuty teprve v průběhu minulého desetiletí. Takzvané multisenzorové souřadnicové měřicí stroje jsou vybaveny jak dotykovými, tak i optoelektronickými senzory a spojují dotykové a optické měření. Teprve tato kombinace umožňuje zvládnout většinu úkolů, které jsou na ně kladeny v průmyslu. [34]

Metody a přístroje pro měření topografie povrchu lze rozdělit na tři základní skupiny:

4.2.1. Mechanické metody

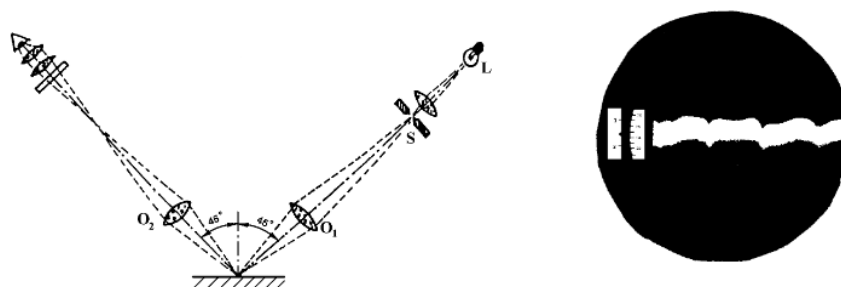
Principem těchto metod měření je porovnávání kontrolované plochy s vzorovou (etanolovou) plochou. Výsledkem je rozdíl drsnosti porovnávaných povrchů. Do této metody můžeme zařadit měřidla s mechanickými komparátory, pneumatické komparátory, elektrické komparátory a fotoelektrické komparátory (obr. 4.2.1.1.). Mechanické metody patří k nejrozšířenějším metodám, zejména pak ve strojírenské praxi. [35]



Obr. 4.2.1.1. Dotykový profilometr [36]

4.2.2 Optické metody

Tyto metody jsou bezdotykové, což vyloučí poškození měřeného povrchu. Dotykový hrot, který je u mechanické metody, je nahrazen světelným paprskem (obr. 4.2.2.1). Ten se odráží nebo rozptyluje na měřeném povrchu. Interakce mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a na vlastnostech měřeného vzorku. Hloubka vníkaní světelného paprsku také ovlivňuje výsledek měření. Tato hloubka se mění podle součinitele absorpce materiálu. [31,36]



Obr. 4.2.2.1 Metoda světelného řezu – princip a obraz v okuláru [36]

4.2.3 Jiné metody

Existuje celá řada metod, které fungují na jiném principu než na mechanickém nebo optickém. Zde jsou uvedeny některé významné metody:

- RTG metoda,
- STM a AFM (scanning tunnelling microscopes a atomic force microscopes),
- SEM (scanning electron microscopes),
- MFM (magnetic force microscopes),
- měření nerovnosti povrchu proudem stlačeného vzduchu,
- atd.

5 Experimentální část

Předmětem diplomové práce je experimentální ověření vlivu řezných parametrů vodního paprsku na topografii povrchu u vybraných technických materiálů. V experimentální části této práce se proto budu zabývat přípravami zkušebních vzorků, jejich měřením a hodnocením topografie a kvality řezných ploch pro dané typy zkušebních materiálů a porovnáním vlivu některých parametrů vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku na kvalitu řezné plochy po řezání.

5.1 Zkušební materiály:

Jako zkušební vzorky pro mou diplomovou práci byly vybrány nerezová ocel 1.4462, dále pak ušlechtilá uhlíková ocel 1.1191, hliníková slitina AlMgSi a mosaz CuZn37.

5.1.1 Nerezová ocel 1.4462

Tato ocel se vyznačuje vyváženou strukturou austenitu a feritu, která vykazuje vysokou korozní odolnost, především v neutrálních a středně kyselých prostředích i za přítomnosti chloridových iontů. Proti odolnosti koroznímu praskání přispívá významně strukturní složení obsahující přibližně 50% feritu a stejný podíl austenitu. [37]

Označení: [37]

EN 10088	AISI (USA)	JIS (Japan)	ČSN
X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462)	317 LN	SUS 329J3L	–

Chemické složení: [37]

Prvek	[%] C _{max}	[%] Mn _{max}	[%] P _{max}	[%] S _{max}	[%] Si _{max}	[%] Cr _{max}	[%] Ni _{max}	[%] N	[%] Mo
Hodnota	0,030	2,00	0,035	0,015	1,00	21,00 – 23,00	4,50 – 6,50	0,10	2,50 – 3,5

Technické informace k materiálu: [37]

Vlastnost	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A % min.	Pevnost v tahu R_p [N·mm ⁻²]	Tvrdość max. [%]	Vrubová houževnatost. (ISO-V) KV J·min
Hodnota	650 až 880	25	450	270	100

5.1.2 Ocel 1.1191

Tato ocel má označení podle ČSN 12 050. Patří mezi nepoužívanější ušlechtilé uhlíkové ocele. Je vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Bývá dodávána v žíhaném stavu s vysokou houževnatostí. Tento materiál se velmi dobře obrábí, má dobrou tvarovou stabilitu po tepelném zpracování. Je nutno počítat s malou prokalitelností. [38]

Tato ocel je vhodná pro pevnostní díly ve všeobecném strojírenství, je vhodná zejména pro tepelně zpracované díly, kdy jsou maximálně využity mechanické vlastnosti oceli. [38]

Chemické složení: [38]

Prvek	[%] C_{max}	[%] Mn_{max}	[%] P_{max}	[%] S_{max}	[%] Si_{max}	[%] Cr_{max}	[%] Ni_{max}	[%] Mo
Hodnota	0,42 – 0,50	0,50 – 0,80	0,035	0,035	0,4	0,4	0,4	0,1

Technické informace k materiálu: [38]

Vlastnost	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tvrdość ve stavu žíhaném na měkko max.	Tvrdość po kalení
Hodnota	590 – 710	200 HB	62 RC.

5.1.3 Hliníková slitina AlMgSi

Je to konstrukční materiál s dobrou tvárností, leštitelností a odolností proti korozi, dobrou schopností elektrolytické oxidace a je vhodný ke svařování. Plastické vlastnosti v žíhaném stavu jsou dobré, ve vytvrzeném stavu vyhovující. Tvářitelnost za teplot 450 - 500°C je velmi dobrá. Materiál neprojevuje sklon ke koroznímu praskání pod napětím. Obrobitelnost řeznými nástroji je nevyhovující v žíhaném stavu a vyhovující ve vytvrzeném stavu. [39]

Použití: letadla, vozidla, ve stavebnictví, potravinářství, pro jemnou mechaniku (např. kabiny letadel a vrtulníků, krytiny, intarzie, rámy dveří, přepážky, eskalátory, nábytek, nýtované mosty, mostové jeřáby, stožáry). [39]

Chemické složení: [39]

Prvek	[%] C	[%] Fe	[%] Cu	[%] Mn	[%] Mg	[%] Cr	[%] Zn	Ti
Hodnota	0,30 – 0,70	0,05 – 0,40	0,10	0,10	0,40 – 0,90	0,10	0,20	0,15

5.1.4 Mosaz CuZn37

Označení Ms63 je starší, ale dosud často používané označení pro mosaz CuZn37 (ČSN 423213, W.Nr.: 2.0321 atd.), kde číslo 63 přibližně vyjadřuje podíl mědi (podrobněji je chemické složení uvedeno v tabulce). Je to nejběžnější mosaz používaná ve výrobě. Je dobře zpracovatelná za studena a je vhodná k pokovování. Má menší odolnost proti korozi, než mají mosazi s vyšším obsahem mědi. Hustota 8430 kg/m³. [40]

Chemické složení: [40]

Prvek	[%] Cu	[%] Zn	[%] Ni	[%] Fe	[%] Pb	[%] Sn	[%] Al	[%] Ostatní
Hodnota	62 – 64	zbytek	do 0,3	do 0,1	do 0,1	do 0,1	do 0,03	do 0,1

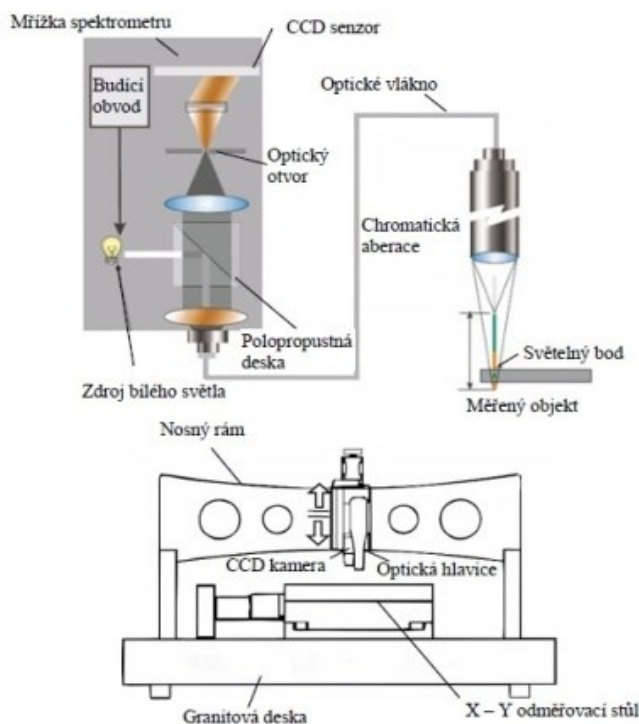
5.2 Měření topografie povrchu

Povrchy zkušebních vzorků vytvořené při experimentu AWJM byly změřeny na profilometru MicroProf FRT optickou metodou. Parametry tohoto přístroje jsou uvedeny v příloze 2.

Princip funkce profilometru MicroProf FRT:

Profilometr je založen na optické metodě snímání zkoumaného povrchu. Tato metoda využívá bezkontaktního principu měření, takže v procesu měření nedochází k mechanickému kontaktu mezi měřicím přístrojem a povrchem materiálu [1,21].

Ze světelného zdroje (obr. 5.2.1) je bílé světlo přiváděno přes optický hranol s polopropustnou deskou ke spojné čočce. Tato čočka rozloží bílé světlo na jednotlivé barevné složky do různých výšek nad vztažnou rovinou. Po dopadu na zkoumaný povrch je světlo odraženo zpět do spojitě čočky a optickým vláknem přivedeno do spektrometru. Hodnoty vystupující ze spektrometru jsou pomocí kalibrační tabulky převedeny na hodnoty vzdálenosti mezi povrchem vzorku a senzorem. Tímto způsobem jsou získány informace o výškové nerovnosti povrchu. [1,21].



Obr. 5.2.1 Schéma optického profilometru [21]

5.3 Experimentální postup

Pro experimentální ověřování vlivu AWJM na topografii řezného povrchu byly na komerčním řezacím stole firmy PTV s.r.o. provedeny průchozí řezy ve vybraných technických materiálech při různých parametrech paprsku. Některé parametry byly udržovány neměnné (tlak vody, průměr vodní trysky, průměr a délka zaostřovací trubice, vzdálenost hlavice od materiálu, úhel dopadu paprsku na materiál a typ abraziva). Měnila se rychlost řezání (50 , 100 a $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) a průtoky abraziva (200 a $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$). Parametry stroje a vysokotlakého čerpadla jsou uvedeny v příloze 1.

Zkušební vzorky vyrobené z nerezové oceli 1.4462, oceli 1.1191, hliníkové slitiny AlMgSi a mosazi CuZn37 (viz kapitola 5.1) byly nařezány na rozměr $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ (délka \times šířka \times hloubka). Pro jednotlivé zkušební vzorky (viz obr. 8.1.1.1 až 8.4.6.1) jsou vstupní hodnoty experimentu pro řezání na komerčním řezacím stole uvedeny v příloze 3.

Následně byly řezné plochy vzorků zkoumány a vyhodnoceny na profilometru MicroProf FRT optickou metodou (viz kapitola 5.2). Parametry tohoto přístroje jsou uvedeny v příloze 2. Pro hodnocení parametrů řezného povrchu byly analyzovány jednotlivé profily povrchu snímáné kolmo k ose řezacího paprsku. Vzdálenost mezi jednotlivými profily byla 1 mm , celkem bylo nasnímáno 13 profilů (linií) pro každý měřený povrch. Jako horní a dolní byly vybrány profily, které jsou vzdáleny od vstupní a výstupní hrany povrchu o 1 mm , protože v místě hrany vzorku se mohou vyskytovat chybné hodnoty nerovností způsobené neočekávanými lomy a odrazy optického paprsku profilometru apod.

Pomocí softwaru pro analýzu dat (SPIP) byly zjištěny parametry řezného povrchu (hodnoty drsností) pro každý profil. Mezi vyhodnocované parametry byly zařazeny *nejvyšší výška profilu R_z a průměrná aritmetická úchylka profilu R_a* . Hodnocena byla také kvalita povrchu po řezání (viz kapitola 4). Výsledné hodnoty parametrů pro jednotlivé profily jsou uvedeny v příloze 4, stupeň kvality každého povrchu je určen v kapitole 5.1.

Experimentální práce byly realizovány na pracovišti Oddělení desintegrace materiálů Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i., které disponuje zařízením na řezání vysokorychlostním

abrazivním vodním paprskem i příslušnou vyhodnocovací a laboratorní technikou. Fotografie z prováděného experimentu jsou uvedeny v příloze 5.

6 Výsledky experimentů

Na následujících stranách jsou uvedeny výsledky experimentů ve formě obrázků a grafů pro každý vzorek (řeznou plochu). Jako první je vždy uvedena fotografie řezné plochy, potom graf vývoje drsností se vzrůstající vzdáleností od horní hrany (hrany vstupu paprsku do řezu). Následuje ukázka dvou profilů z horní (1) a dolní (2) části řezné plochy, včetně znázornění jejich umístění na ploše. Dole je pak uvedeno vlastní zařazení řezné plochy do kvalitativního stupně.

V další části jsem porovnal drsnosti řezných ploch pro jednotlivé materiály řezané rychlostí $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro hmotnostní průtok abraziva 300 a $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$.

6.1 Nerezová ocel 1.4462

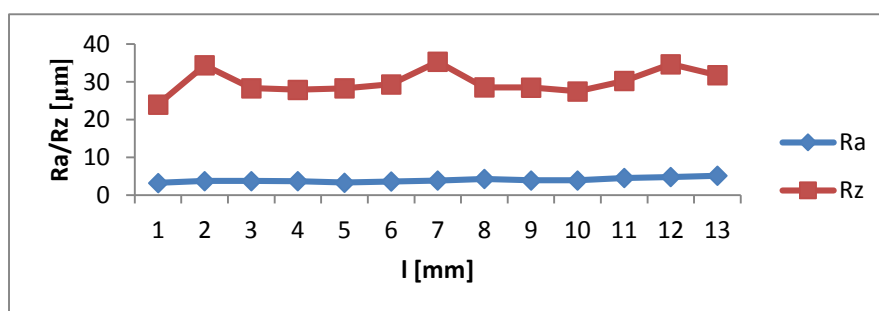
Zkušební vzorek č. 1

(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



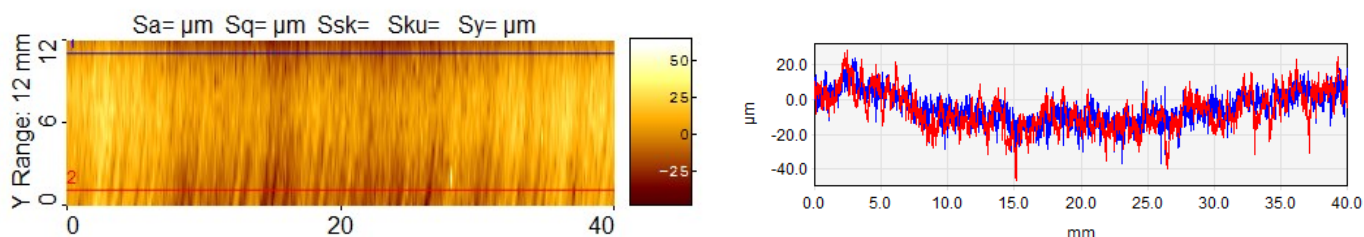
Obr. 6.1.1.1 Zkušební vzorek č. 1

Naměřené drsnosti:



Graf 6.1.1.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:



Obr. 6.1.1.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

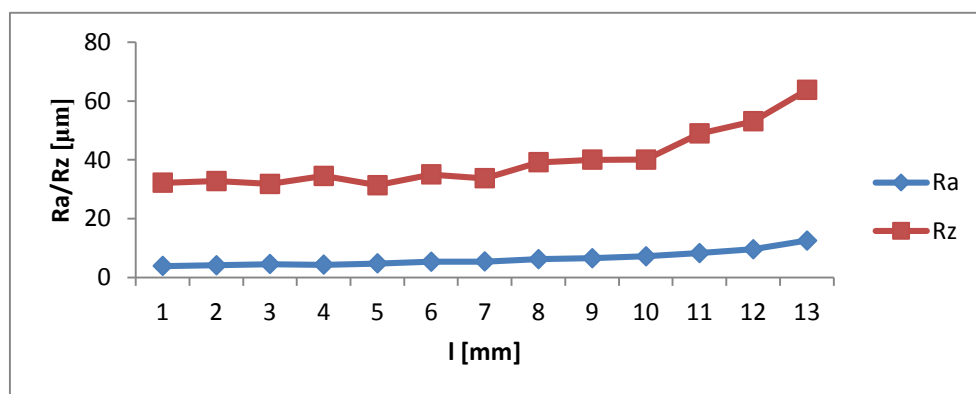
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 2

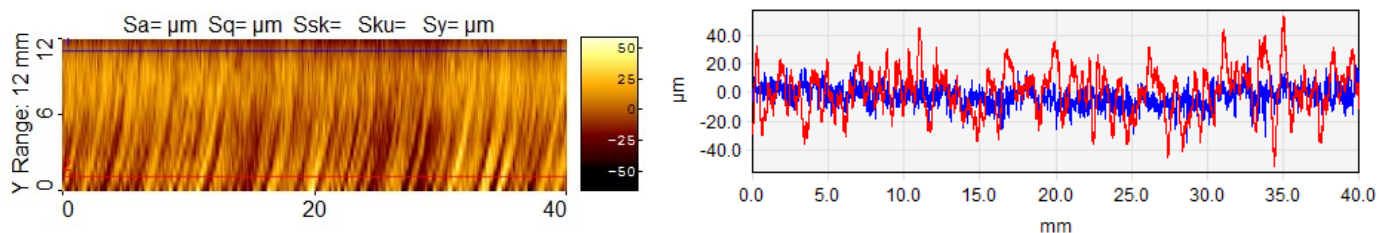
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.1.2.1 Zkušební vzorek č. 2

Naměřené drsnosti:

Graf 6.1.2.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.1.2.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

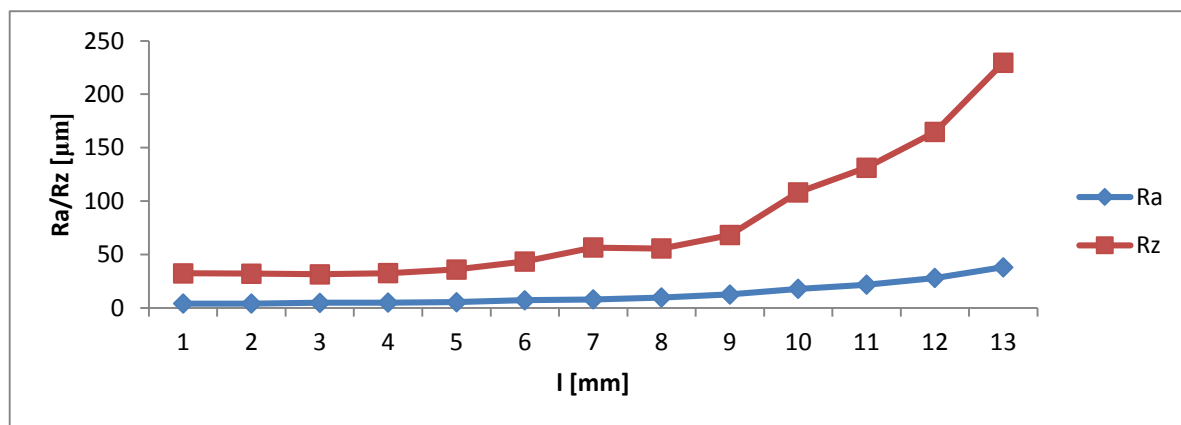
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q4.

Zkušební vzorek č. 3

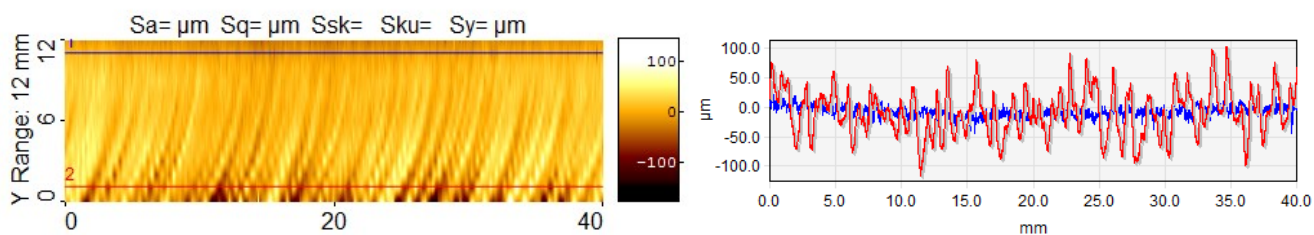
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.1.3.1 Zkušební vzorek č. 3

Naměřené drsnosti:

Graf 6.1.3.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.1.3.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

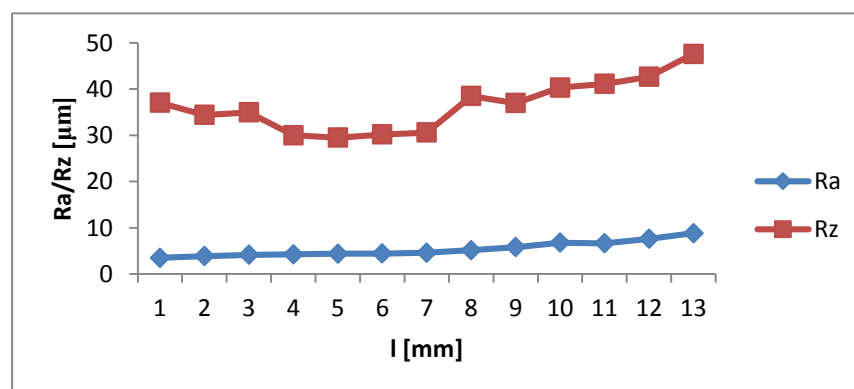
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeneho povrchu do třídy Q2.

Zkušební vzorek č. 4

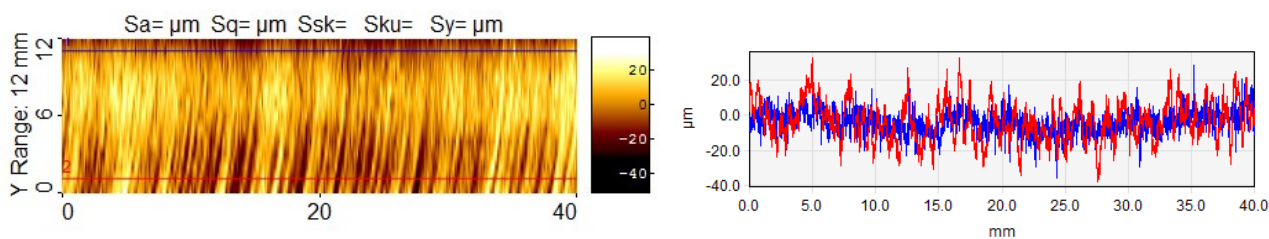
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.1.4.1 Zkušební vzorek č. 4

Naměřené drsnosti:

Graf 6.1.4.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.1.4.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

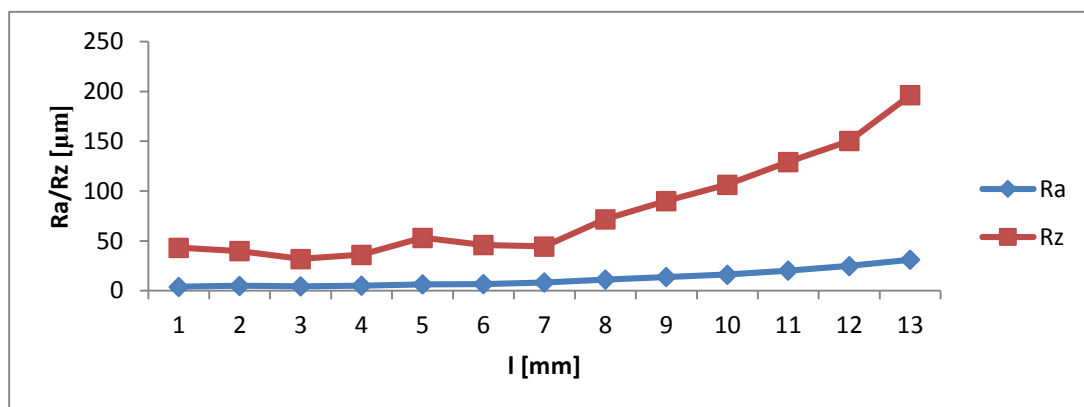
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 5

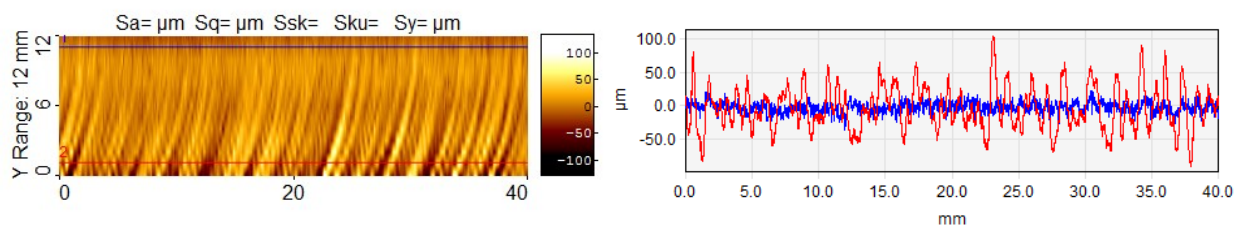
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.1.5.1 Zkušební vzorek č. 5

Naměřené drsnosti:

Graf 6.1.5.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

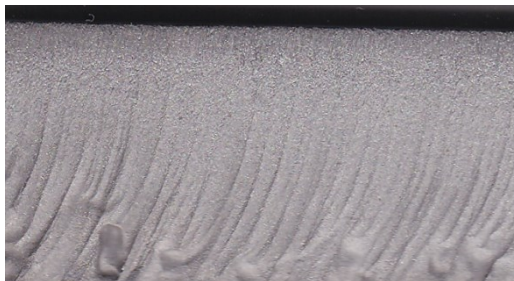
Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.1.5.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

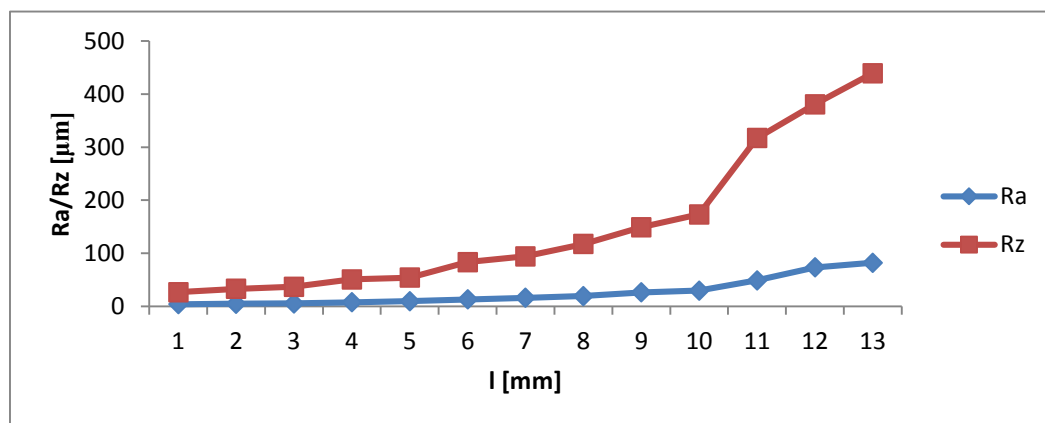
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q2.

Zkušební vzorek č. 6

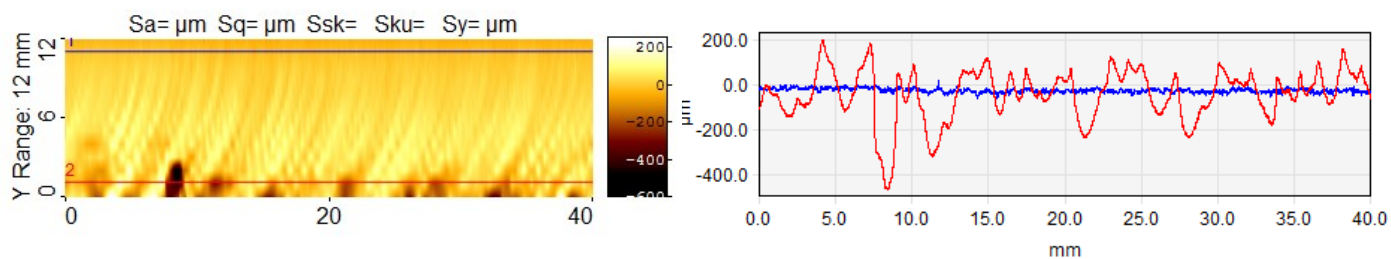
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.1.6.1 Zkušební vzorek č. 6

Naměřené drsnosti:

Graf 6.1.6.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.1.6.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q1.

6.2 Mosaz CuZi37

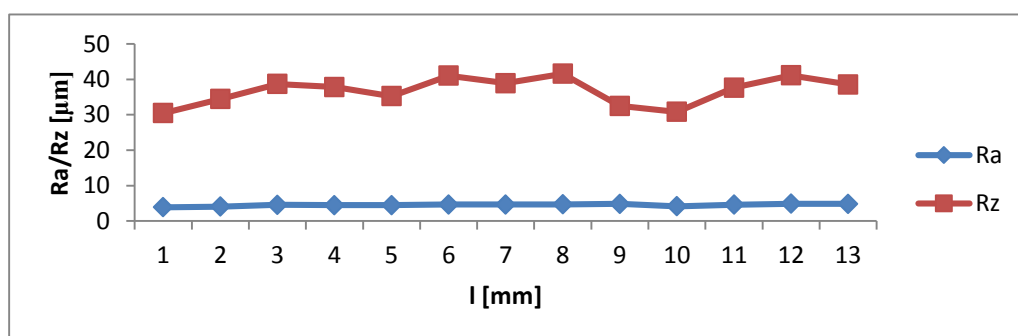
Zkušební vzorek č. 1

(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



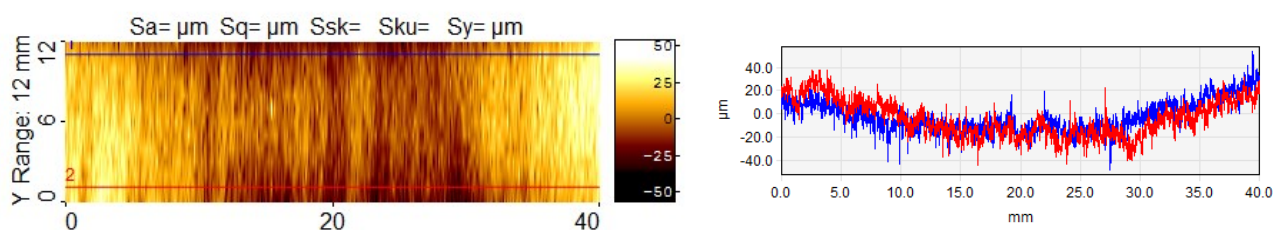
Obr. 6.2.1.1 Zkušební vzorek č. 1

Naměřené drsnosti:



Graf 6.2.1.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:



Obr. 6.2.1.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

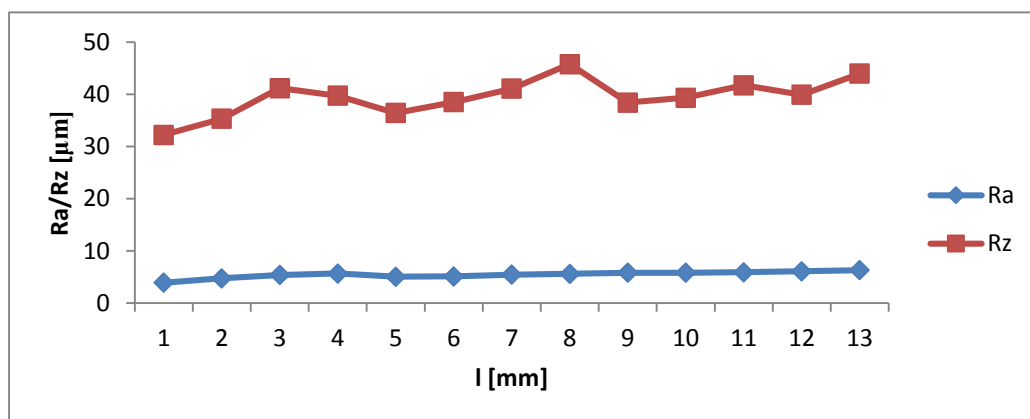
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 2

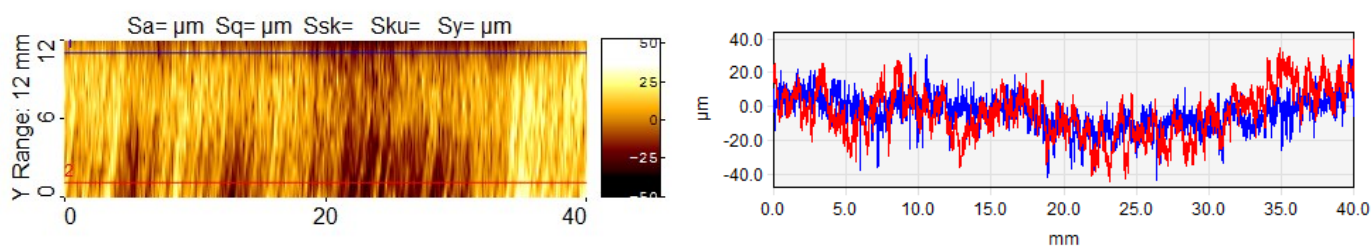
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.2.2.1 Zkušební vzorek č. 2

Naměřené drsnosti:

Graf 6.2.2.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.2.2.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

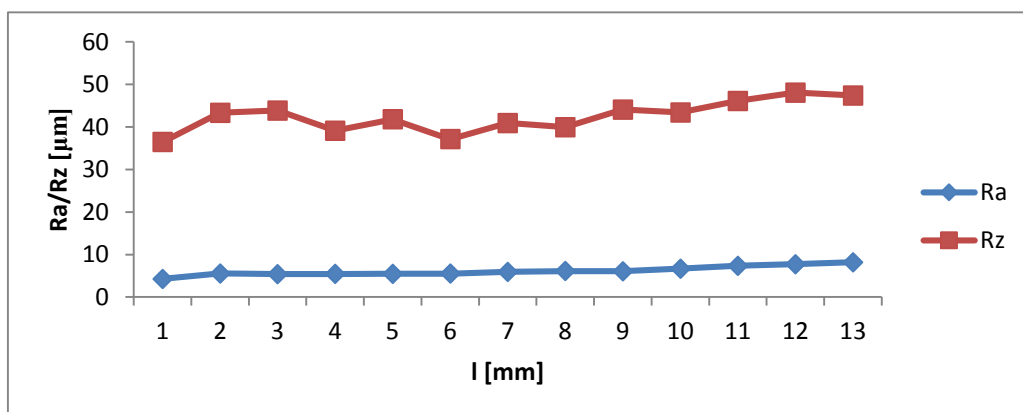
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 3

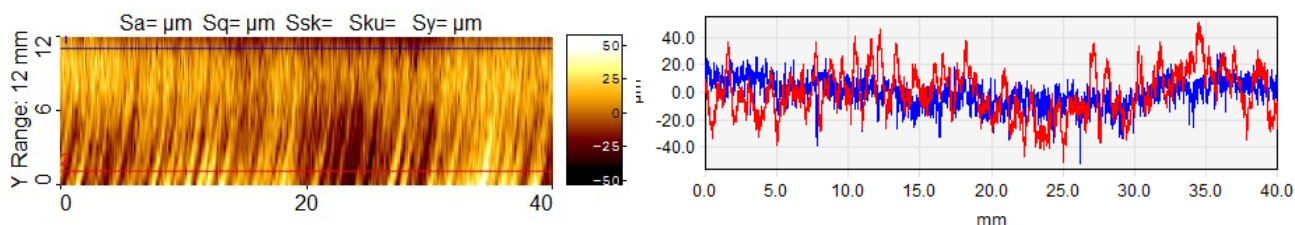
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.2.3.1 Zkušební vzorek č. 3

Naměřené drsnosti:

Graf 6.2.3.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.2.3.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

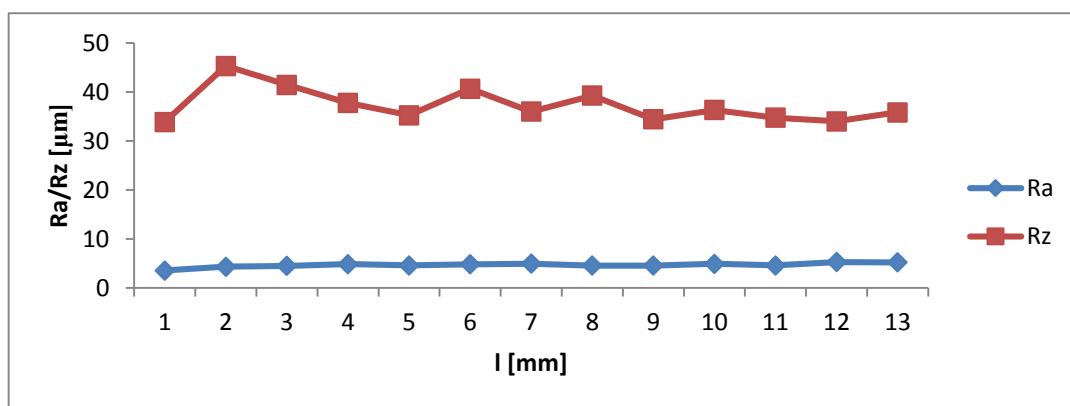
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 4

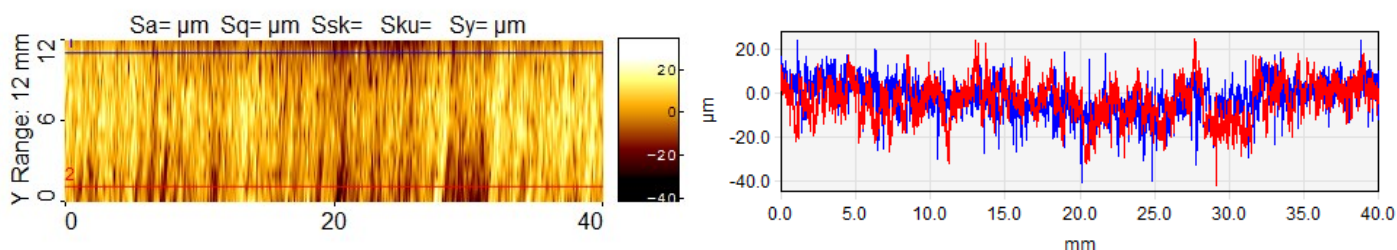
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.2.4.1 Zkušební vzorek č. 4

Naměřené drsnosti:

Graf 6.2.4.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.2.4.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

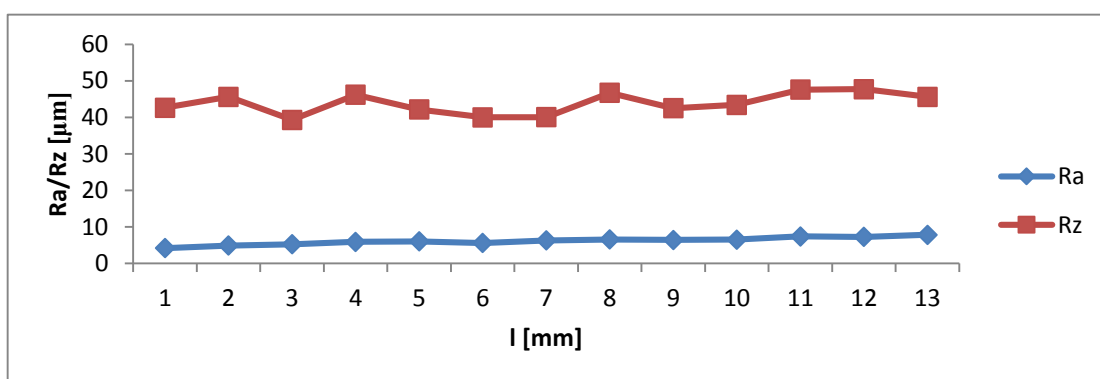
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 5

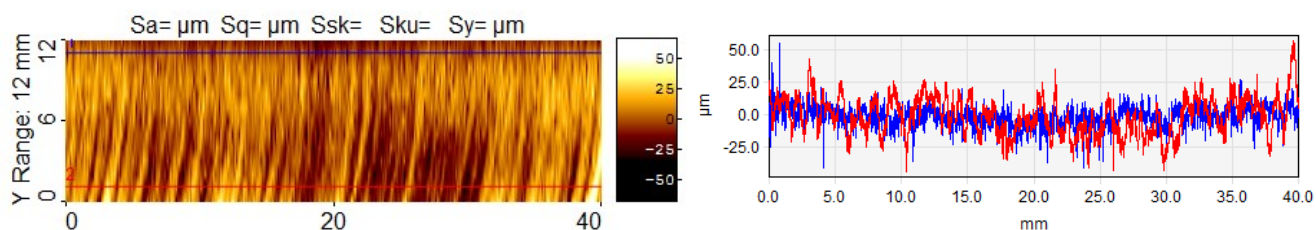
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.2.5.1 Zkušební vzorek č. 5

Naměřené drsnosti:

Graf 6.2.5.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.2.5.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

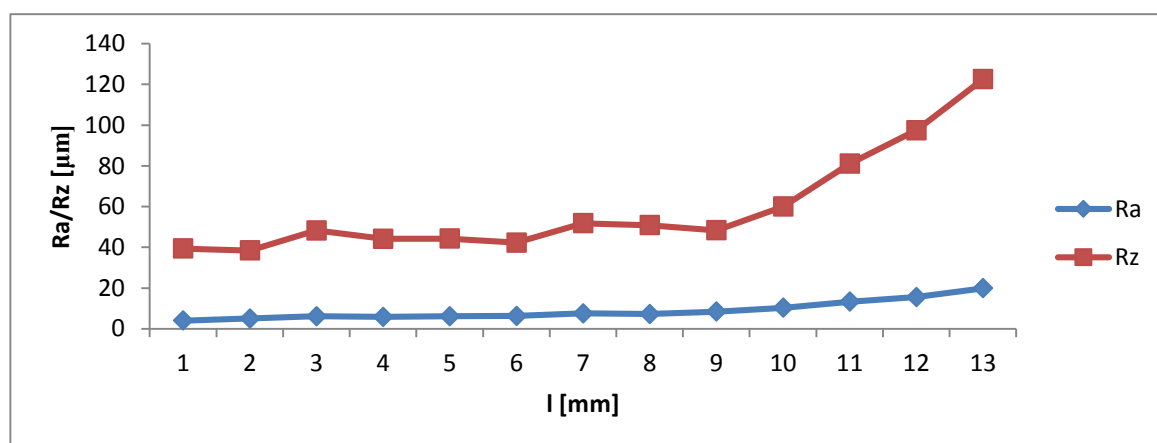
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeneho povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 6

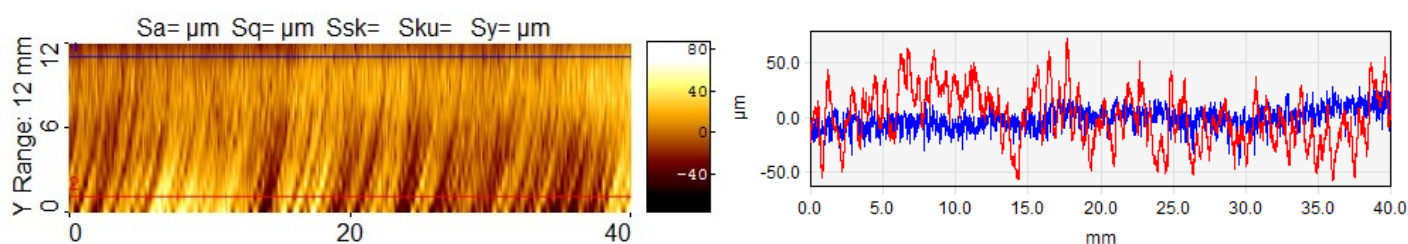
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.2.6.1 Zkušební vzorek č. 6

Naměřené drsnosti:

Graf 6.2.6.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.2.6.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q4.

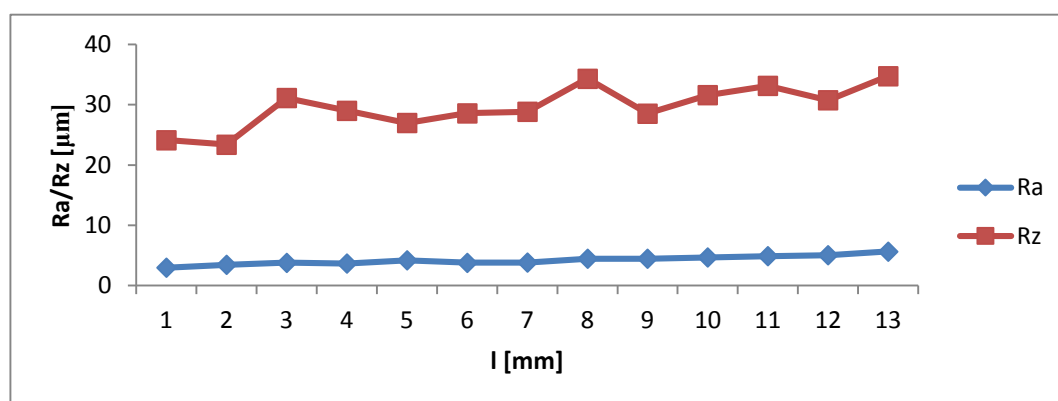
6.3 ocel 1.1191

Zkušební vzorek č. 1

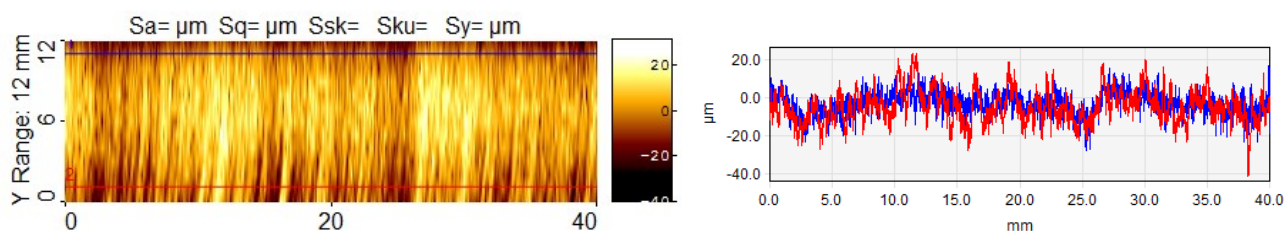
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.3.1.1 Zkušební vzorek č. 1

Naměřené drsnosti:

Graf 6.3.1.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.3.1.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

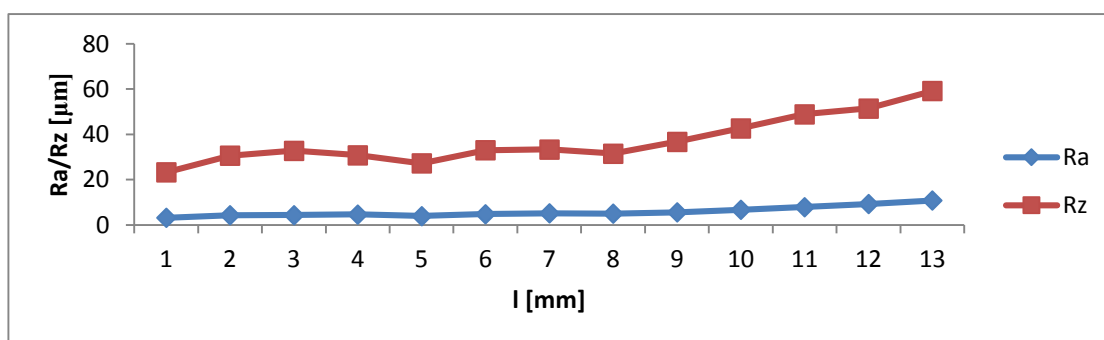
Zkušební vzorek č. 2

(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



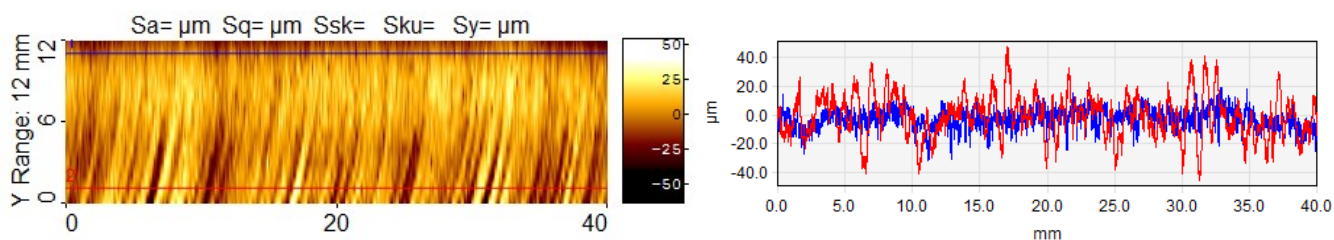
Obr. 6.3.2.1 Zkušební vzorek č. 2

Naměřené drsnosti:



Graf 6.3.2.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:



Obr. 6.3.2.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

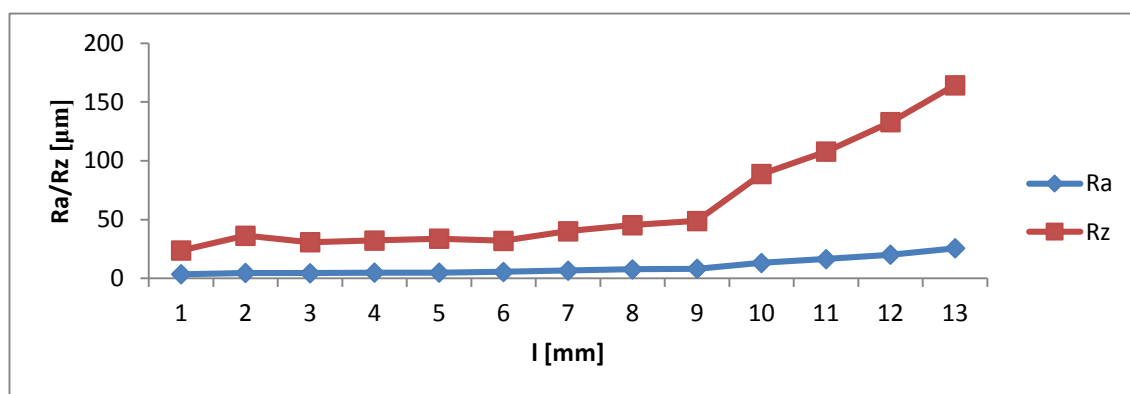
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 3

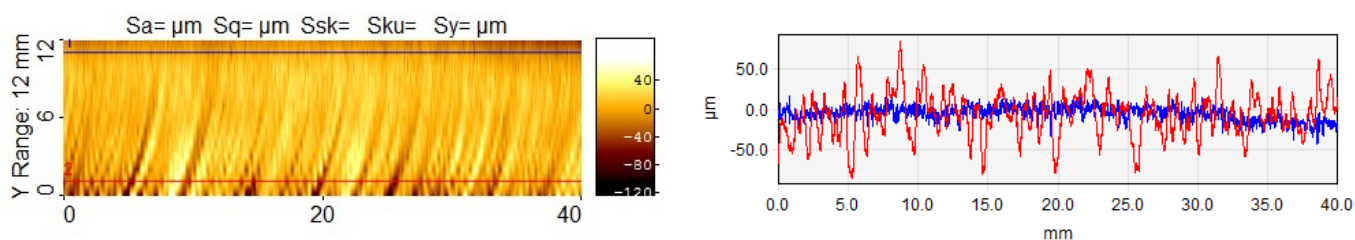
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.3.3.1 Zkušební vzorek č. 3

Naměřené drsnosti:

Graf 6.3.3.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.3.3.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

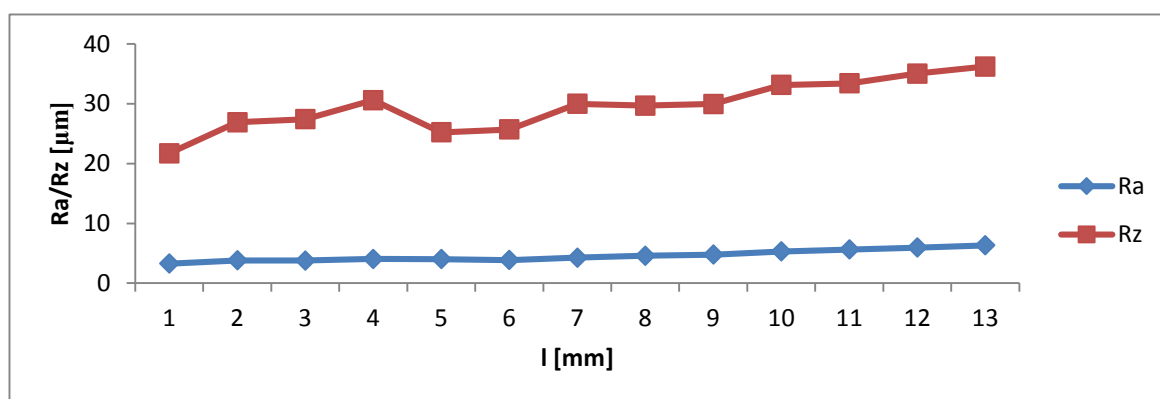
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q4.

Zkušební vzorek č. 4

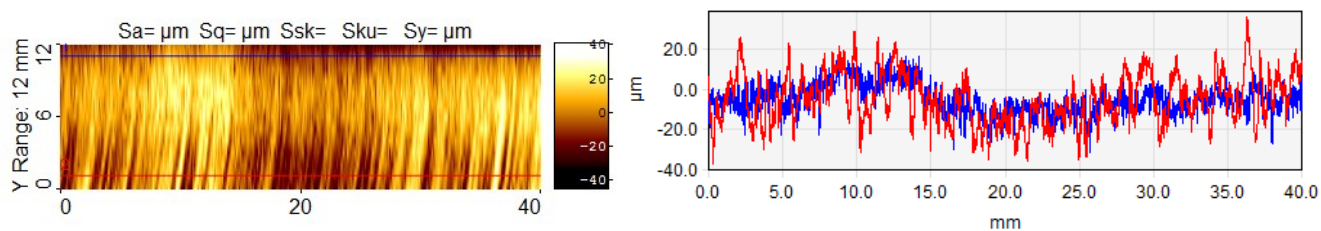
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.3.4.1 Zkušební vzorek č. 4

Naměřené drsnosti:

Graf 6.3.4.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.3.4.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

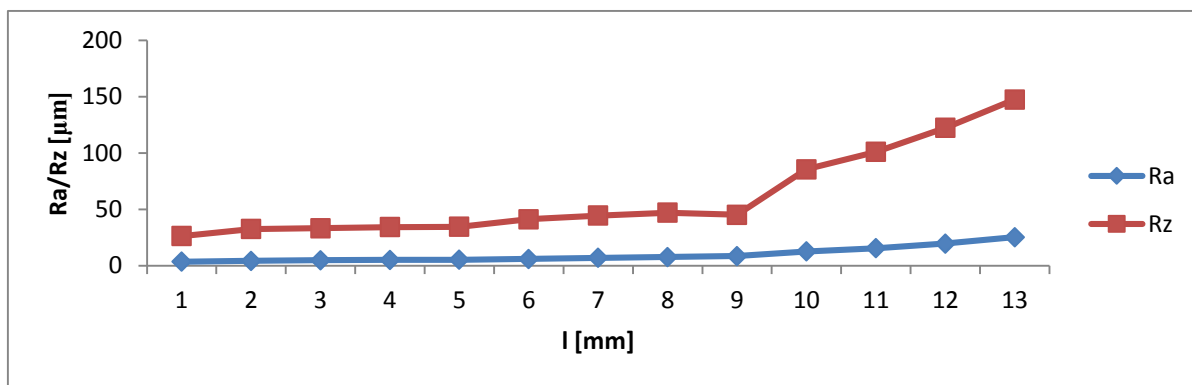
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 5

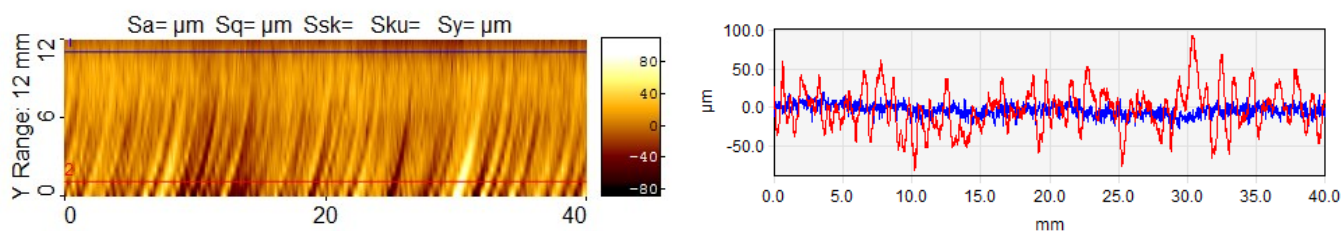
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.3.5.1 Zkušební vzorek č. 5

Naměřené drsnosti:

Graf 6.3.5.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.3.5.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

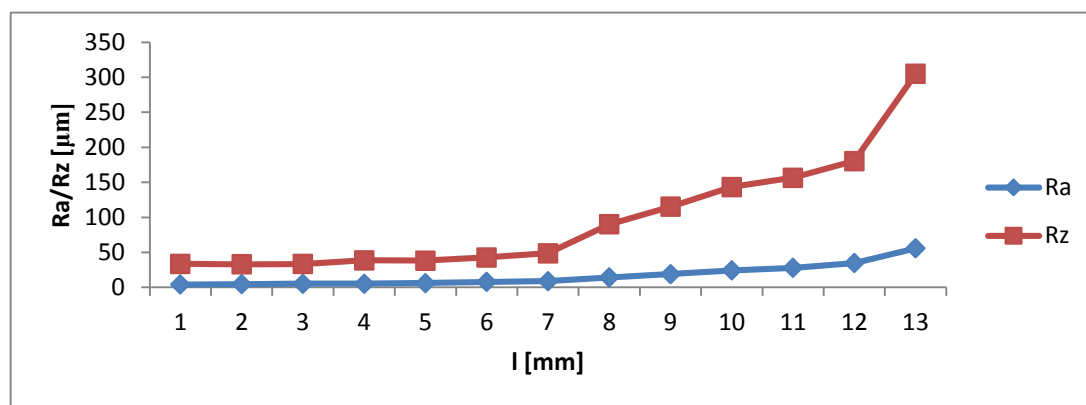
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q4.

Zkušební vzorek č. 6

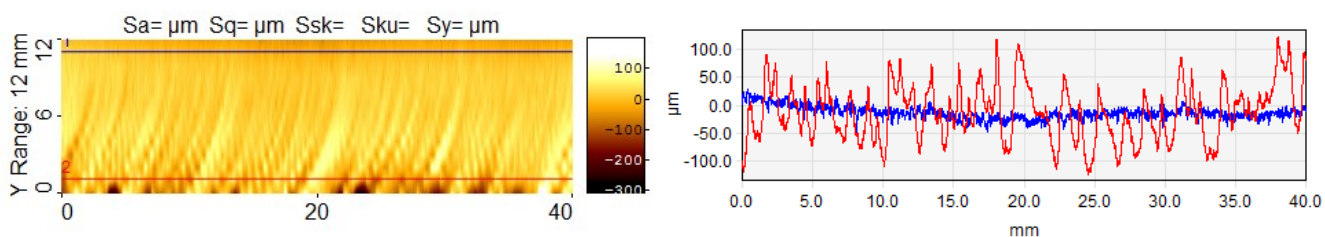
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.3.6.1 Zkušební vzorek č. 6

Naměřené drsnosti:

Graf 6.3.6.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.3.6.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q2.

6.4 Hliníková slitina AlMgSi

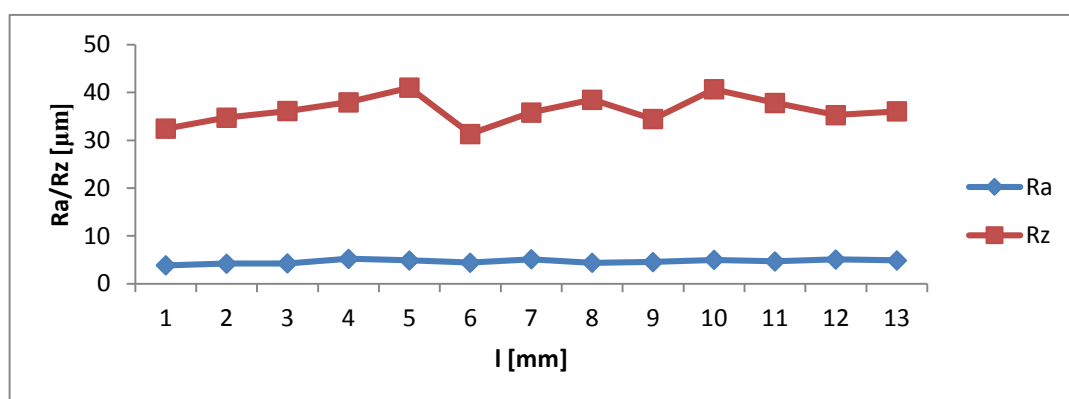
Zkušební vzorek č. 1

(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



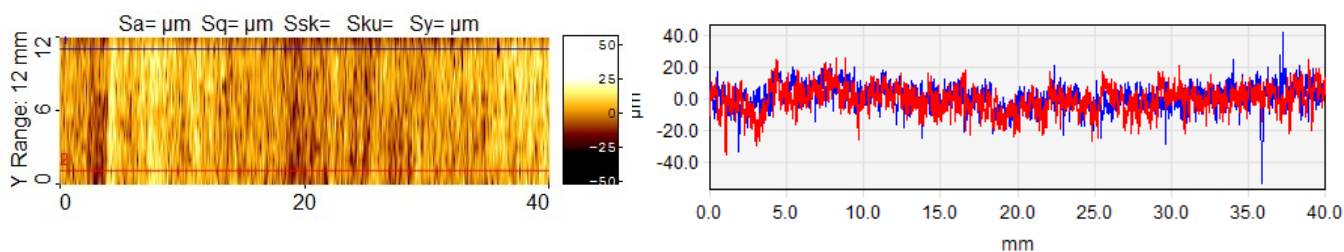
Obr. 6.4.1.1 Zkušební vzorek č. 1

Naměřené drsnosti:



Graf 6.4.1.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:



Obr. 6.4.1.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

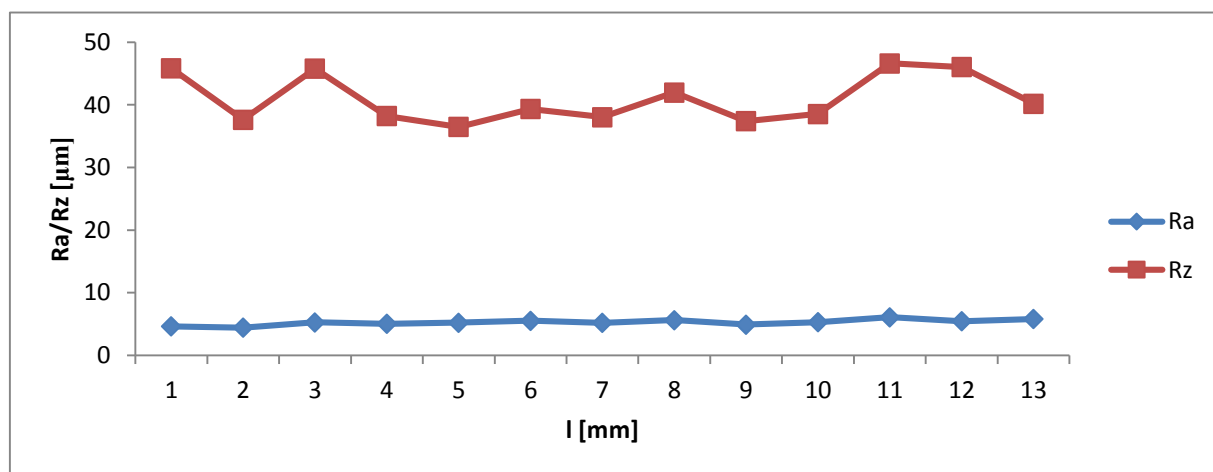
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 2

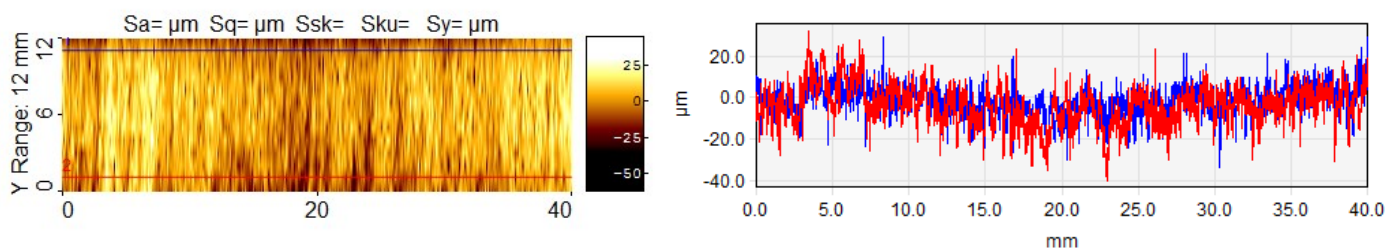
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.4.2.1 Zkušební vzorek č. 2

Naměřené drsnosti:

Graf 6.4.2.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.4.2.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

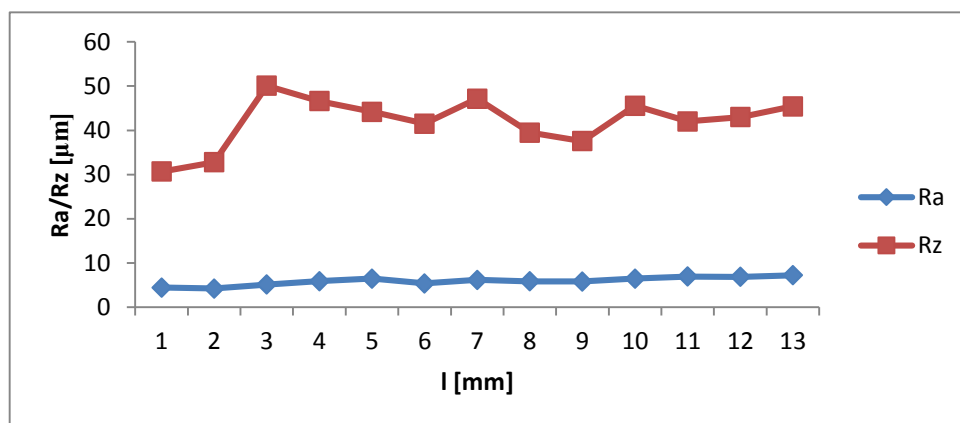
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeneho povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 3

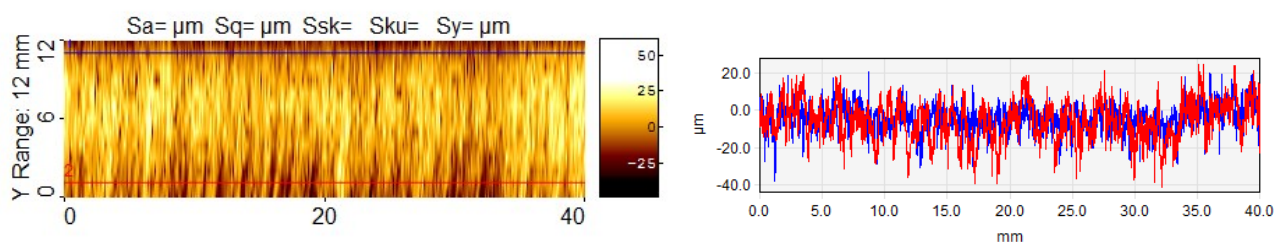
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.4.3.1 Zkušební vzorek č. 3

Naměřené drsnosti:

Graf 6.4.3.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.4.3.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

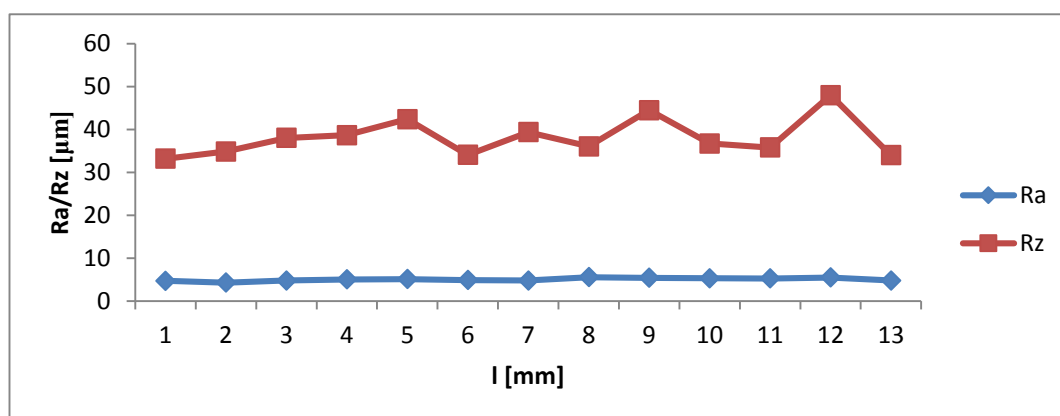
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 4

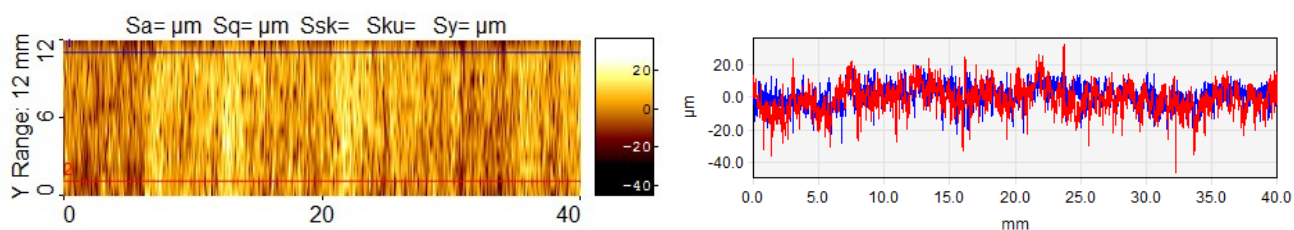
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.4.4.1 Zkušební vzorek č. 4

Naměřené drsnosti:

Graf 6.4.4.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.4.4.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

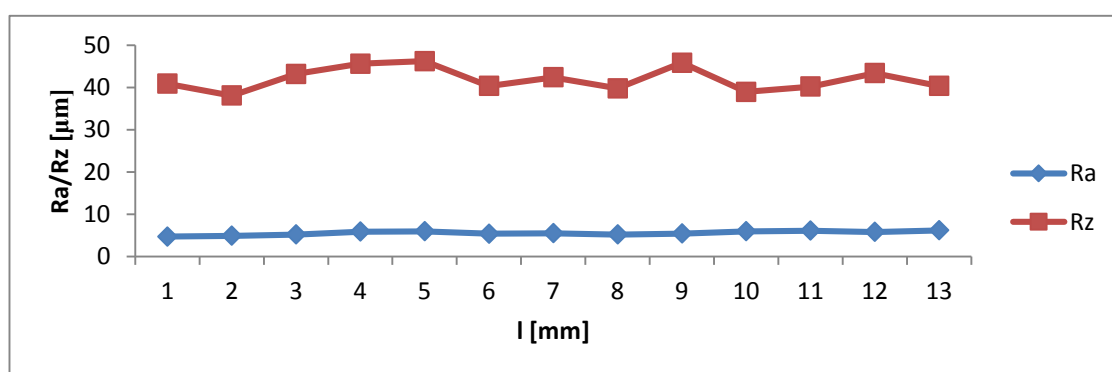
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 5

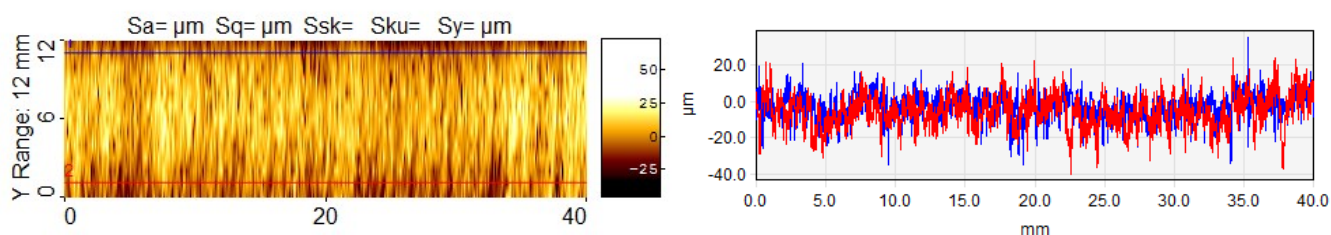
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.4.5.1 Zkušební vzorek č. 5

Naměřené drsnosti:

Graf 6.4.5.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

Obr. 6.4.5.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

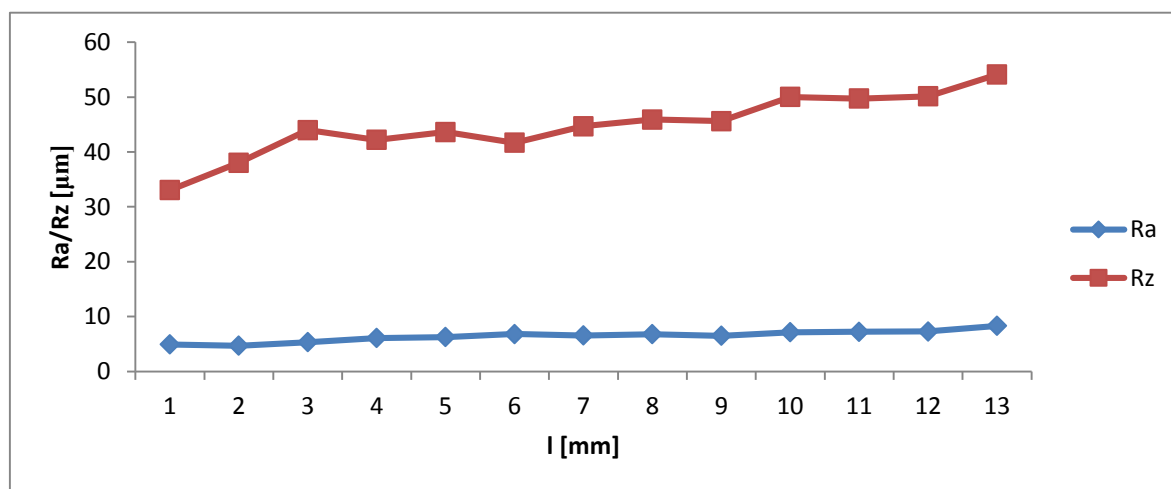
Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeneho povrchu do třídy Q5.

Zkušební vzorek č. 6

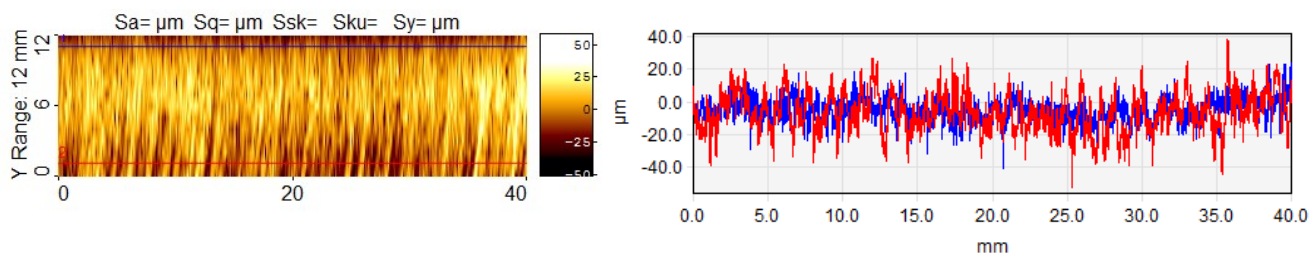
(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 6.4.6.1 Zkušební vzorek č. 6

Naměřené drsnosti:

Graf 6.4.6.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu

Ukázka profilů řezné plochy:

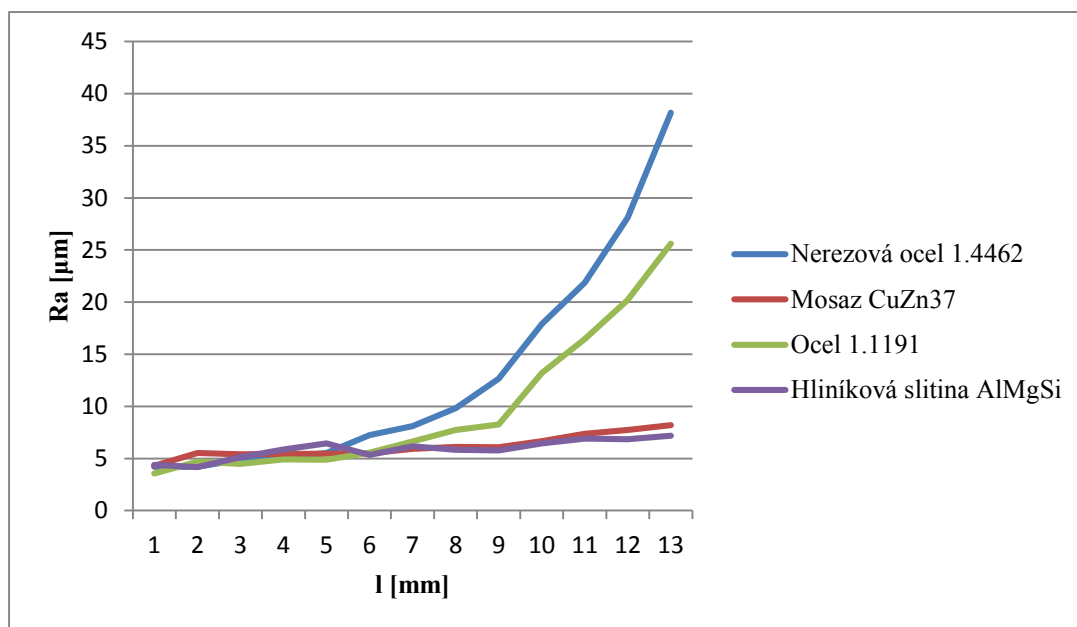
Obr. 6.4.6.2 Rekonstrukce řezné plochy a ukázka profilů včetně jejich umístění na ploše

Tento zkušební vzorek jsem zařadil podle kvality obrobeného povrchu do třídy Q5.

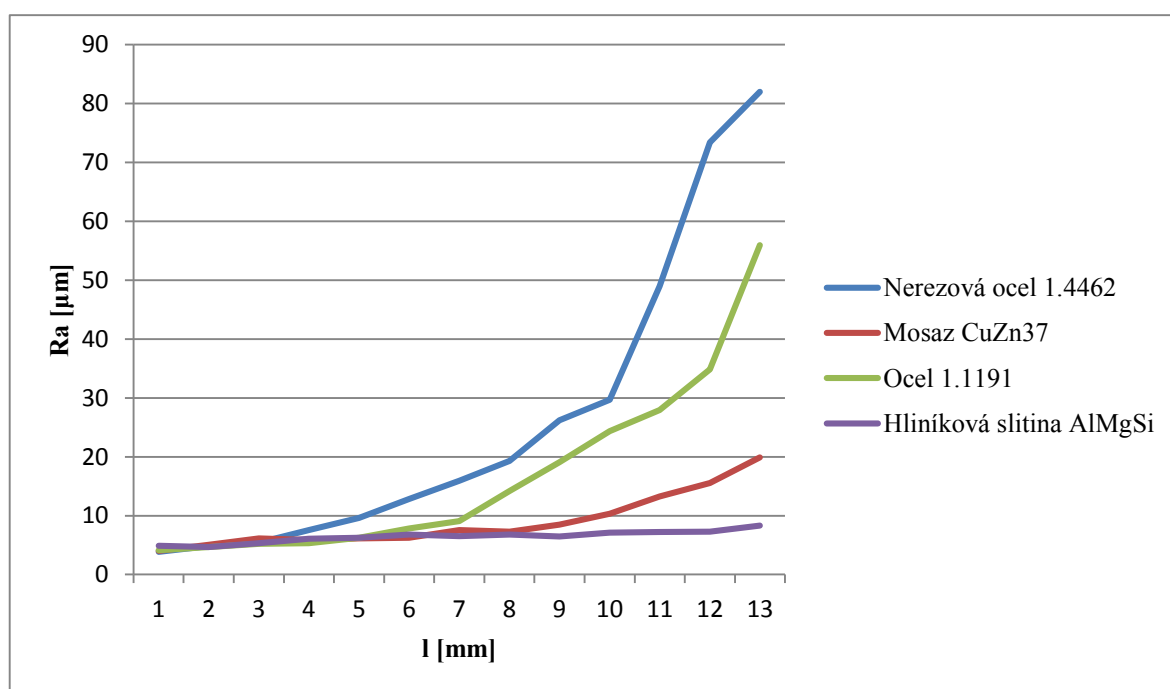
6.5 Porovnání vzorků

a) Nejvyšší výška profilu R_a :

(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)

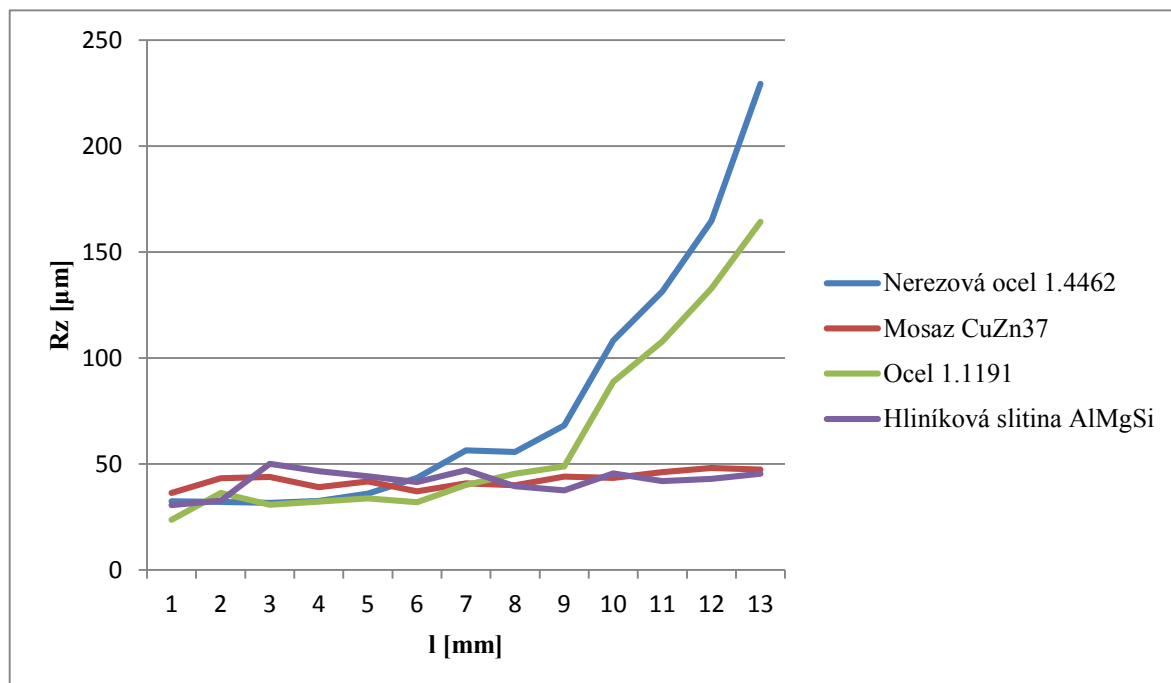


(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost řezání $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)

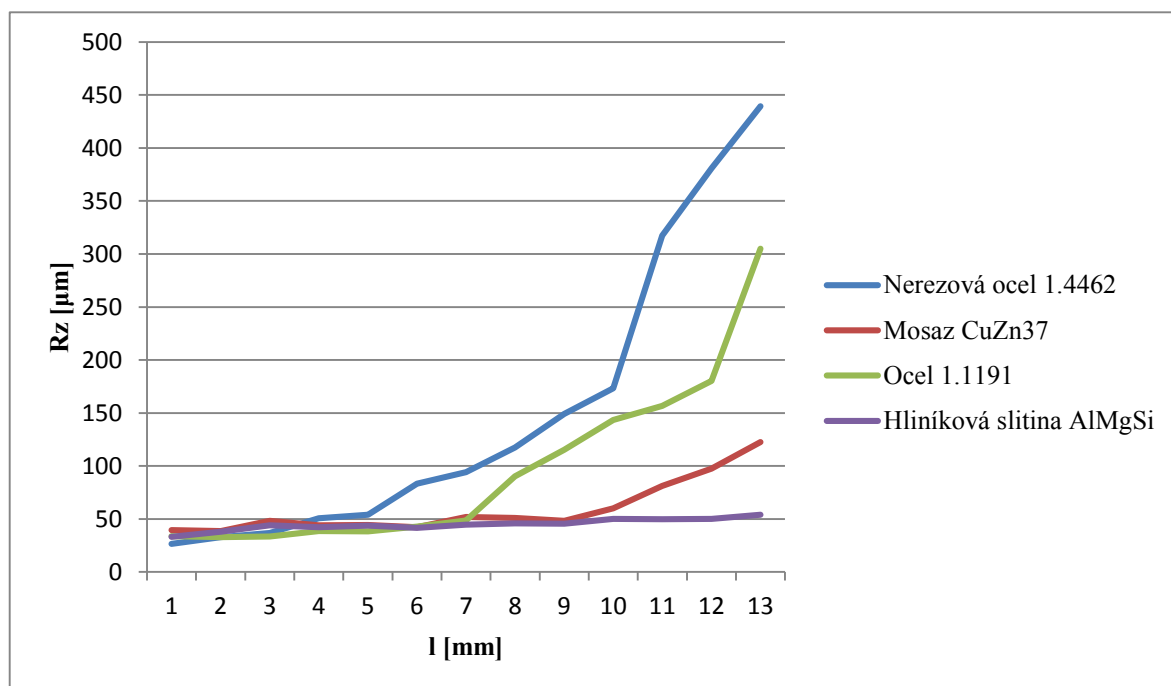


b) Nejvyšší výška profilu Rz:

(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva 300 g·min⁻¹, rychlost řezání 150 mm·min⁻¹)



(tlak vody 350 MPa, hmotnostní průtok abraziva 200 g·min⁻¹, rychlost řezání 150 mm·min⁻¹)



6 Diskuse výsledků

Z uvedených výsledků je zřejmé, že tvar řezné plochy po řezání abrazivním vodním paprskem je podobný plochám řezaným i jinými paprskovými metodami (laser, plasma). V horní části (v místě vstupu paprsku do materiálu) je plocha téměř hladká bez výraznější vlnitosti. Drsnost povrchu zde dosahuje nejnižších hodnot. Se vzrůstající vzdáleností od vstupní hrany se zvyšuje vlnitost i drsnost plochy a je zřejmé, že se paprsek v řezu ohýbá proti směru řezného pohybu. Drsnost plochy v dolní části, kde paprsek opouští materiál, je největší.

Řezná rychlost má podstatný vliv na drsnost povrchu zejména v dolní části plochy. Při nízké řezné rychlosti ($50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) se drsnost v horní a dolní části plochy příliš neliší a se vzdáleností od vstupní hrany vzrůstá jen nepatrně. Při nejvyšší zkoumané rychlosti ($150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) je pak rozdíl v drsnosti mnohonásobně větší. Při nízké rychlosti se také paprsek méně ohýbá a je schopen lépe prořezat materiál i ve spodní části. Je zřejmé, že pro dosažení kvalitní plochy řezu v celé ploše (kvalita Q5 případně Q4) je nutno podstatně snížit rychlost řezání.

Nižší hmotnostní průtok abraziva se projevuje ve vyšší drsnosti v celé ploše u všech zkoumaných materiálů. Nejmarkantněji se však tento jev projevuje u tvrdých kovů (nerezová ocel a ušlechtilá uhlíková ocel) ve spodní části řezné plochy nerezové oceli bylo dosaženo zhruba 2x větší hodnoty Ra při nižším průtoku ($200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$) v porovnání s vyšším průtokem ($300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$). Lze konstatovat, že vyšší hmotnostní průtok abraziva přispívá ke kvalitnějšímu povrchu.

U měkčích kovů, jako je třeba hliníková slitina a mosaz, neměla změna rychlosti řezání vodním paprskem a hmotnostního průtoku abraziva na drsnost povrchu tak velký vliv jako u tvrdších kovů (obr 5.4.1.1 – 5.4.6.1). Je to dáno především zvolenými rozsahy obou parametrů paprsku (rychlost řezání a hmotnostní průtok abraziva), kdy řezné plochy měkčích materiálů při zvolených parametrech dosahují vyšších kvalitativních stupňů (Q5 a Q4). Nejlepší kvality řezné plochy bylo dosaženo u hliníku, který kladl průniku abrazivního paprsku nejmenší odpor. Zhoršení drsnosti i celkové kvality řezné plochy u měkčích kovů lze očekávat zejména ve spodní části při vyšších rychlostech řezání, než byly zkoumány, a také při nižších, než zkoumaných průtocích abraziva.

Tato zjištění v zásadě odpovídají poznatkům, ke kterým dospěla i další výzkumná pracoviště zabývající se technologií vysokorychlostních vodních paprsků. Pro každý řezaný materiál je vhodné stanovit konkrétní parametry vodního paprsku tak, aby bylo dosaženo požadované kvality řezné plochy dle očekávaných požadavků. [42, 43]

7 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo zhodnotit kvalitu řezných ploch vybraných technických materiálů po dělení vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. Tohoto cíle bylo dosaženo měřením, interpretací a analýzou naměřených dat.

V teoretické části jsem se zmínil o některých nekonvenčních metodách obrábění. Jednotlivé metody jsem stručně popsal a naznačil fyzikální principy. Uvedl jsem také podstatné výhody a nevýhody každé metody a jejich nejčastější použití. Blíže jsem se věnoval technologii vysokorychlostního vodního paprsku a zařízením používaným ke generování a řezání paprskem. Teoretickou část jsem zakončil porovnáním nekonvenčních metod obrábění podle vybraných parametrů při řezání materiálu a uvedl jsem metody hodnocení topografie řezného povrchu.

V experimentální části jsem popsal přípravu zkušebních vzorků pro hodnocení kvality řezné plochy a způsob měření a vyhodnocování plochy po dělení vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. V příslušné části jsem uvedl výsledky experimentů a stručně je zhodnotil.

Hlavním výsledkem práce je zjištění, že zkoumané parametry vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku (řezná rychlost a hmotnostní průtok abraziva) mají podstatný vliv na drsnost a kvalitu řezné plochy. Při použití vysoké řezné rychlosti je dosaženo horších kvalit povrchu (zejména u tvrdých kovů), než při použití malé rychlosti. Podobně nižší hmotnostní průtok abraziva zhoršuje výslednou drsnost a kvalitu řezné plochy. U měkkých kovů nebylo při testovaných parametrech abrazivního vodního paprsku zaznamenáno výrazné zhoršení řezné plochy. Měkké kovy lze abrazivním vodním paprskem řezat snadněji. Při shodných parametrech řezání je dosahováno lepší kvality řezného povrchu ve srovnání s tvrdšími kovy.

Zadáním správných vstupních hodnot řezání (obrábění) lze výrazně ovlivnit výslednou kvalitu povrchu obrobku i výrobní časy. Tím lze ovlivnit ekonomické ukazatele a produktivitu práce při výrobě. Před vlastním řezáním je tak nutno stanovit, jaká kvalita řezné plochy je požadována a podle toho se nastaví příslušné parametry technologie pro konkrétní řezaný materiál.

8 Použitá literatura

[1] CHROBÁK, L. Hodnocení řezné plochy po dělení vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 51s. Vedoucí práce: Sitek, L.

[2] MACHÁČEK, D. Chemické technologie obrábění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

[3] KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. Nekonvenční technologie: [učebnice]. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998. Učebnice pro odborné školy. ISBN 80-7200-296-1.

[4] SADÍLEK, Marek. Nekonvenční metody obrábění I. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.

[5] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.

[6] ZELENÝ, Radek. Stroje pro nekonvenční metody obrábění. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 49s. 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda

[7] Speciální metody obrábění: Obrábění ultrazvukem. [online]. [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/Specialni_metody.htm

[8] BULLEN: Ultrasonic Machining. [online]. [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://www.bullentech.com/ultrasonic-machining>

[9] ŘASA, JAROSLAV, PŘEMYSL POKORNÝ a VLADIMÍR GABRIEL. STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění 2. díl. 2. vydání. Praha 6 - Břevnov: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-336-3.

[10] TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 3. část. HUMÁR, Anton a Anton HUMÁR. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [online]. 2005 [cit. 2013-12-29]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf

[11] Non Traditional Manufacturing Processes. [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z: http://www.turnxon.com/articles/articles_5.html

[12] nekonvenční metody obrábění – 4. díl: 5 Obrábění paprskem fotonů – laserem. [online]. [cit. 2014-02-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>

[13] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting). [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>

[14] YOUSSEF, Helmi A a Hassan EL-HOFY. Machining technology: machine tools and operations. Boca Raton: CRC Press, c2008, xxxvi, 633 p. ISBN 14-200-4339-0. Dostupné z: http://books.google.cz/books?id=IleBqfaGK1oC&printsec=frontcover&dq=isbn:1420043404&hl=cs&sa=X&ei=E_JwU9OjJuOg4gSK-IC4Dg&ved=0CDIQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false

[15] 1 Laserové a plazmové řezání (84,83): laserové řezání - 84. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>

[16] ŘASA, Jaroslav a KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 8. díl: Obrábění paprskem iontů – plazmatem. [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>>

[17] BILÍK, Oldřich. Obrábění I. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2002, 2 sv. ISBN 80-7078-811-91.

[18] Nekonvenční metody obrábění - 6. díl: 6 Obrábění paprskem elektronů. [online]. [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2.html>

[19] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. KATEDRA OBRÁBĚNÍ A MONTÁŽE. Technologie II. 2. díl. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf

[20] Využití plazmy v technologii: 1. Díl. [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/vyuziti-plazma-v-technologie-1-dil/>

[21] ZELENÁK, Michal. Měření a analýza nerovnosti povrchů vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením z hlediska materiálu a mechanismu desintegrace. Ostrava, 2012. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/96295/ZEL075_HGF_P1701_1702V001_2012.pdf?sequence=1. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Aplikovaná fyzika. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

[22] DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6113&cid=6.html>

[23] Vodní paprsek. [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>

[24] STEINER, MARTIN. SOUČASNÝ STAV A BUDOUCNOST NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU V PODMÍNKÁCH PRŮMYSLU ČESKÉ REPUBLIKY. Brno, 2008. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4908. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. Vedoucí práce Ing. KAREL OSIČKA.

[25] Učíme se v prostoru [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2573 31.1

[26] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. MM Průmyslové spektrum: Nekonenční metody obrábění 9. díl. [online]. [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-9-dil.html>

[27] Stereolitografie [online]. Nová média, s. r. o. — 3D-tisk.cz, 2014 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>

[28] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.

[29] FLOW: Resources. [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://www.flowasia.com/waterjet-resources.cfm-id=335.htm>

[30] ŠVERCL, Josef. Technické kreslení a deskriptivní geometrie: PRO ŠKOLU A PRAXI. 1. vydání. Praha 5 – Smíchov: SCIENTIA, spol. s r. o., 2003. ISBN 80-7183-297-1.

[31] HLAVÁČEK, P. Měření textury povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením jemnozrnných materiálů. Ostrava: katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 48 s. Diplomová práce, vedoucí: Valíček, J.

[32] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobu (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut, 1999.

[33] SPECIÁLNÍ METODY OBRÁBĚNÍ: Přednáška č. 14: Obrábění vodním paprskem a laserem. POPOV, Alexey a Jan JERSÁK. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_SMO_PR_14_CZE_Popov-Jersak_Obrabeni_vodnim_paprskem_a_laserem.pdf

[34] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: Měření rozměrů, tvaru, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rengenovou tomografií. 2008. Uherské Hradiště: L.V. Print, 2008.

[35] GAJDOŠÍK, David. Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřicí techniku Mytutoyo SJ 210. České Budějovice, 2013. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita - Pedagogická fakulta. Vedoucí práce PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.

[36] TICHÁ, Š.: Strojírenská metrologie část 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.

[37] Bolzano X2CrNiMoN22-5-3 [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x2crnimon22-5-3-duplexn>

[38] Preciz 1.1191 [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.1191>

[39] PROAL Hliník AlMgSi [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424401.htm>

[40] Mosaz [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.litomysky.cz/mat/ms.htm>

[41] *WJTA-IMCA: Abrasive Water Jet Cutting (AWJC) of Co-Cr-Mo Alloy Investment Castings in the Medical Device Industry* [online]. 2013 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: http://www.wjta.org/wjta/Conference_Proceedings.asp

[42] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis 1995. ISBN 1-880342-01-4.

[43] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.